



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

Rozprawa doktorska

*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.

Streszczenie

Technika oświetleniowa 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, na skutek intensywnej eksploatacji, oświetlenie wewnątrz jest jednym 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 sterowania oświetleniem, wykorzystujące ściemnianie lamp.

Praca składa się z sześciu rozdziałów, w których zawarto opisy analiz, badań symulacyjnych, ankietowych i doświadczalnych prowadzonych z wykorzystaniem infrastruktury Małopolskiego Laboratorium Budownictwa Energooszczędnego, w zakresie możliwości poprawy efektywności energetycznej oświetlenia, przy użyciu nowoczesnej instalacji elektrycznej stosowanej w budownictwie biurowym typu *smart*. Scharakteryzowano różne metody sterowania oświetleniem oraz przeprowadzono analizę uzyskiwanych z ich wykorzystaniem oszczędności energii. Zwrócono także uwagę na aspekt akceptacji przez ludzi systemów automatycznego sterowania, niezbędnej dla uzyskania wysokiej efektywności energetycznej w rzeczywistym obiekcie. Wykazano, że indywidualne preferencje oświetleniowe ludzi są zróżnicowane, a w biurach znacząca liczba osób preferuje natężenie oświetlenia niższe niż rekomendowane. Przedstawiono także wyniki badań własnych dotyczących subiektywnej oceny oświetlenia w nowoczesnym środowisku biurowym, które potwierdziły ten wniosek.

Na podstawie przeprowadzonych rozważań, zaproponowano metodę lokalnego, spersonalizowanego sterowania oświetleniem w otwartej przestrzeni biurowej, 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, niewykorzystanych biurek jest przyciemniane. Metoda ta łączy zatem regulację indywidualną oraz sterowanie zależne od zajętości poszczególnych stanowisk. Na potrzeby optymalizacji tego typu problemu lokalnego sterowania, przy minimalnym zużyciu energii, opracowano dwa modele matematyczne systemu oświetleniowego, stosując modelowanie analityczne oraz sztuczne sieci neuronowe. Badania symulacyjne i doświadczalne przedstawionej metody przeprowadzono na przykładzie wybranego pomieszczenia, którego charakterystyka oraz przyjęte rozmieszczenie miejsc pracy są typowe dla nowoczesnych biur typu *open space*. Rezultaty wykazały, że proponowana metoda sterowania umożliwia poprawę efektywności energetycznej pracy systemu oświetleniowego oraz warunków oświetleniowych wytwarzanych na stanowiskach pracy, względem tradycyjnej instalacji oświetleniowej.

Abstract

Lighting technology is an interdisciplinary field that combines the technical elements of lighting installation work, the health aspect of human functioning in created lighting conditions, as well as aesthetic issues. All these elements should be considered in any kind of lighting considerations. In office buildings, due to intensive use, interior lighting is one of the main elements of their energy consumption. Thanks to the functional capabilities of integrated automation and control systems in smart buildings, it is possible to rationalize energy consumption in the area of lighting, as well as improve the conditions of visual work of people. Currently, due to the high luminous efficiency of LED sources when working in a reduced light state, lighting control methods that use dimming are gaining importance.

This thesis consists of six chapters containing descriptions of analyzes, as well as simulation, questionnaire and experimental studies conducted with the use of the infrastructure of the Małopolska Laboratory of Energy Efficient Building, regarding the possibilities of improving the energy efficiency of lighting with the use of modern electrical installations used in smart office buildings. The author characterized various methods of lighting control and analyzed the energy savings obtained with their use. Attention was also paid to the aspect of human acceptance of automatic control systems, necessary for obtaining high energy efficiency in the actual building. It has been shown that people's individual lighting preferences are varied, and in offices a significant number of people prefer lighting levels lower than recommended. The results of the author's own research on the subjective assessment of lighting in a modern office environment, which confirmed this conclusion, were also presented.

Based on the aforementioned considerations, the author proposed a method of local, personalized lighting control in an open office space, which, using a matrix of independently controlled LED lamps of general lighting, allows users to adjust the lighting intensity at the workplace in order to meet specific, individual lighting needs. The lighting of the remaining, unused desks is dimmed. Therefore, this method combines personal tuning and occupancy control of individual desks. To optimize this type of local control problem with minimal energy consumption, two mathematical models of the lighting system were developed using analytical modeling and artificial neural networks. The simulation and experimental studies of the presented method were carried out on the example of a selected room, which characteristics and arrangement of workplaces are typical of modern open space offices. The results showed that the proposed control method leads to an improvement in both the energy efficiency of the illumination system and the lighting conditions created at workplaces, compared to the traditional lighting installation.

Pragnę podziękować wszystkim osobom, które przyczyniły się do powstania tej pracy.

W szczególności dziękuję mojemu promotorowi dr. hab. inż. prof. AGH Robertowi Stali za opiekę merytoryczną i okazaną pomoc.

Serdecznie dziękuję także promotorowi pomocniczemu dr. inż. Szczepanowi Moskwie za opiekę i szczególną troskę o mój rozwój naukowy, w czasie naszej wieloletniej współpracy.

Dziękuję dr. hab. inż. arch. prof. PK Marcinowi Furtakowi za życzliwość i motywację do rozwoju naukowego.

Dziękuję również dr. inż. Annie Romańskiej-Zapale za inspirujące dyskusje i wszelakie wskazówki.

Szczególne podziękowania składam także mojej ukochanej żonie Justynie, Rodzicom oraz przyjaciołom.

Spis treści

| | |
|---|-----|
| 1. Wstęp..... | 11 |
| 1.1. Instalacja elektryczna oświetleniowa | 12 |
| 1.2. Efektywność energetyczna..... | 15 |
| 1.3. Budynek typu <i>smart</i> | 19 |
| 1.4. Teza i cele pracy | 24 |
| 2. Analiza możliwości poprawy efektywności energetycznej pracy instalacji oświetleniowej, z wykorzystaniem nowoczesnej instalacji elektrycznej stosowanej w budownictwie biurowym typu <i>smart</i> | 29 |
| 2.1. Zapotrzebowanie na energię przez oświetlenie wewnątrz | 30 |
| 2.2. Możliwości poprawy efektywności energetycznej instalacji oświetleniowych | 31 |
| 2.3. Budynek typu <i>smart</i> , a efektywność energetyczna | 38 |
| 2.4. Akceptacja systemów automatycznego sterowania przez ludzi..... | 44 |
| 2.5. Biura na planie otwartym..... | 48 |
| 2.6. Schematy obecności ludzi w przestrzeniach biurowych | 50 |
| 2.7. Identyfikacja metod sterowania oświetleniem mających na celu poprawę efektywności energetycznej..... | 52 |
| 3. Identyfikacja parametrów otoczenia świetlnego mających wpływ na subiektywną ocenę jakości oświetlenia..... | 81 |
| 3.1. Obecne rekomendacje dotyczące oświetlenia biurowych stanowisk pracy.... | 81 |
| 3.2. Indywidualne preferencje oświetleniowe ludzi | 85 |
| 3.3. Charakterystyka pomieszczenia doświadczalnego | 87 |
| 3.4. Pomiar parametrów charakteryzujących jakość oświetlenia w pomieszczeniu doświadczalnym | 90 |
| 3.5. Subiektywna ocena oświetlenia w pomieszczeniu doświadczalnym | 93 |
| 4. Propozycja metody spersonalizowanego sterowania oświetleniem ogólnym | 105 |
| 4.1. Potrzeba regulacji indywidualnej w biurach wieloosobowych | 105 |
| 4.2. Problematyka lokalnego sterowania oświetleniem w biurach typu <i>open space</i> | 109 |
| 4.3. Dobór modelu symulacyjnego pomieszczenia doświadczalnego | 111 |
| 4.4. Metoda spersonalizowanego sterowania oświetleniem ogólnym, modelowanie matematyczne systemu oświetlenia..... | 118 |
| 4.5. Optymalizacja problemu lokalnego sterowania oświetleniem przy minimalnym zużyciu energii..... | 132 |

| | |
|---|-----|
| 4.6. Analiza możliwości poprawy efektywności energetycznej oświetlenia z wykorzystaniem metody spersonalizowanego sterowania | 135 |
| 4.7. Wnioski | 142 |
| 5. Wytyczne do ustawień oświetlenia w otwartej przestrzeni biurowej, z wykorzystaniem nowoczesnych instalacji elektrycznych stosowanych w budynkach biurowych typu <i>smart</i> | 147 |
| 6. Podsumowanie..... | 153 |
| 7. Literatura..... | 161 |
| 8. Spis tabel i ilustracji..... | 179 |
| 9. Załączniki..... | 183 |

1. Wstęp

Człowiek dysponuje pięcioma podstawowymi zmysłami – wzrokiem, słuchem, smakiem, węchem i dotykem, które dostarczają mu informacji o otaczającym świecie. Ocenia się, że spośród wszystkich zmysłów to wzrok dostarcza aż ponad 80% informacji o otoczeniu [1]. Zmysł ten umożliwia odbieranie bodźców wywołanych przez promieniowanie widzialne (światło) – wąski zakres widma promieniowania elektromagnetycznego, ograniczony długością fal od 380 – 400 do 760 – 780 nm¹ [2, 3, 4, 5, 6].

Światło jest niezwykle ważne dla ludzkiego zdrowia i samopoczucia. Ma wpływ na nastrój, emocje i umysłowe pobudzenie ludzi. Podtrzymuje i reguluje rytmy dobowe, wpływa na stan fizjologiczny i psychiczny człowieka [7, 8, 9, 10, 11, 6, 12, 13, 14]. Rolę światła w życiu człowieka można określić poprzez realizację dwóch funkcji, odpowiadających dwojakiemu charakterowi odpowiedzi organizmu na stymulację oka światłem [15, 8, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 10, 11]:

- funkcji oświetlania (fotorecepcja wizualna) – światło umożliwia widzenie, tj. postrzeganie otoczenia poprzez rozróżnianie jego szczegółów, stopnia jasności i barw oraz rozpoznawanie ruchu, a także wpływa na psychikę człowieka,
- efektu biologicznego niewizualnego (fotorecepcja niewizualna) – światło oddziałuje na procesy biologiczne zachodzące w ciele człowieka poprzez bezpośrednią stymulację części mózgu, które wpływają na funkcje poznawcze i sprawność umysłową oraz synchronizację ludzkiego zegara biologicznego (światło nadaje funkcjonowaniu człowieka rytm okołodobowy wpływając na gospodarkę hormonalną (np. melatoniny i kortyzolu), metabolizm i krążenie krwi.

Obie funkcje wymagają percepcji wzrokowej poprzez wizualne (czopki i pręciki) i niewizualne (ipRGCs)² fotoreceptory umieszczone w siatkówce oka, przy udziale nerwu wzrokowego oraz mózgu [20, 22, 11, 12].

Światło naturalne (dienne) wytwarzane przez Słońce towarzyszy człowiekowi od wieków, tworząc środowisko w którym żyjemy [23, 24, 10]. Wydłużenie dobowej aktywności człowieka stało się możliwe dzięki opanowaniu ognia – początkowo ogniska i pochodnie, świece woskowe, a w późniejszych czasach także lampy spalające olej, naftę, alkohol czy gaz umożliwiły iluminację wnętrz i otoczenia domostw [24, 25, 26].

¹ Zakres obszaru widzialnego nie jest precyzyjnie zdefiniowany i został przyjęty umownie, ponieważ krzywa czułości oka dąży do zera wraz z rosnącą lub malejącą długością fal elektromagnetycznych. Czułość na bodźce wzrokowe jest także zależna od wrażliwości osobniczej. Jak wynika z doświadczenia promieniowanie o długości fali 360 – 830 nm wywołuje u człowieka wrażenia wzrokowe, jednakże zdolność pobudzania światłoczułych części oka falami o długości spoza zakresu 400 – 760 nm jest bardzo mała [3]. Przyjmując jako granicę czułości oka, czułość wynoszącą 1% jej wartości maksymalnej zakres obszaru widzialnego wynosi około 430 – 690 nm [388].

² W 2001 roku w siatkówce oka odkryto rodzaj fotoreceptorów nazywanych światłoczułymi komórkami zwojowymi siatkówki - ipRGCs (*intrinsically photosensitive retinal ganglion cells*) [11].

Znane ludzkości techniki oświetleniowe okazały się niewystarczające w czasach rewolucji przemysłowej w drugiej połowie XVIII wieku. Potrzeba umożliwienia ciągłej produkcji masowej, nawet w porze nocnej, stała się inicjatorem rozwoju nowych metod oświetleniowych. Początkowo wdrożono udoskonalenia, oparte na użyciu reflektorów, które wzmacniały skuteczność znanych źródeł światła. Dopiero postępy w zakresie elektryczności osiągnięte przez Humphry Davy'ego, który w 1809 roku wynalazł lampę łukową, Michaela Faradaya i innych pionierów, doprowadziły do przełomu w metodach oświetlania i ostatecznego „scalenia” iluminacji z elektrycznością, co dało początek znanej dziś technice świetlnej. Wynalezienie żarówki, zaprezentowanej przez Josepha Wilsona Swana w 1878 roku i opatentowanej przez Thomasa Edisona w 1880 roku doprowadziło do popularyzacji elektrycznych źródeł światła [24, 27].

Od tego czasu, wraz z rozwojem techniki świetlnej opracowano metodykę wykorzystywania oświetlenia sztucznego w celach poprawy warunków postrzegania podczas wykonywania zadań wzrokowych, a także kształtowania otoczenia świetlnego dla uzyskania oczekiwanego komfortu pracy lub wypoczynku. Wprowadzono zestandaryzowane dokumenty określające warunki oświetleniowe jakie powinny panować na stanowiskach pracy. Ponadto, mamy coraz większą wiedzę na temat wpływu światła na psychikę i regulację procesów biologicznych zachodzących w organizmie człowieka [23, 8]. Dbałość o środowisko naturalne stymulowała rozwój źródeł światła o wysokiej sprawności, układów zasilających umożliwiających ściemnianie, a także ulepszonych opraw oświetleniowych. Wprowadzenie tzw. inteligentnych systemów oświetlenia elektrycznego otworzyło nowe możliwości kreowania otoczenia świetlnego i poprawy efektywności energetycznej oświetlenia w budynkach [20]. Technika świetlna jest obecnie jedną ze specjalności elektrotechniki, a zarazem interdyscyplinarną dziedziną nauki, ściśle związaną z architekturą, medycyną, psychologią, optoelektroniką czy grafiką komputerową [4, 3].

1.1. Instalacja elektryczna oświetleniowa

Współczesny człowiek spędza większość czasu w budynkach, które stanowią jego bezpośrednie otoczenie. Szacuje się, średnio jest to 20 godzin na dzień [28], a w krajach rozwiniętych nawet niemal 22 godziny dziennie [29]. W związku z tym jedną z podstawowych funkcji, którą powinny realizować budynki jest zapewnianie komfortowych warunków pracy wzrokowej ludzi, niezależnie od ilości dostępnego światła naturalnego. Możliwe jest to dzięki instalacjom elektrycznym oświetleniowym [30], które stanowią niezbędny element infrastruktury współczesnego budynku [31, 32]. Ogół urządzeń technicznych służących do oświetlenia budynku (urządzenia oświetleniowe wraz z przewodami i urządzeniami zabezpieczającymi i sterowniczymi) stanowi także jeden z jego podstawowych systemów technicznych, poza takimi systemami jak: ogrzewania, chłodzenia, wentylacji, nawilżania, osuszania, ciepłej wody

użytkowej czy wytwarzania energii elektrycznej [33, 34]. Zastosowane w systemach oświetlenia oprawy, składają się z źródła światła wraz z układem zasilającym, układu optycznego kształtującego wiązkę światła oraz obudowy, fizycznie zespalającej elementy składowe oprawy. Oprawy oświetleniowe emitują promieniowanie świetlne z zakresu interpretowanego przez człowieka jako światło białe – od żółtobiałego (ciepłego) do niebieskobiałego (zimnego). W specyficznych zastosowaniach, np. w oświetleniu dekoracyjnym stosuje się także oświetlenie o barwach chromatycznych.

Projektowanie oświetlenia jest wieloetapowym procesem, uwzględniającym kwestie elektryczne, ergonomiczne oraz architektoniczne. Rozpoczyna go faza planowania, kiedy to określa się potrzeby i oczekiwania użytkowników, istniejące ograniczenia, a także wyznacza główne cele projektowe. Następnie, na tej podstawie z uwzględnieniem obowiązujących przepisów i norm, formułowane są wymagania projektowe. W kolejnym, trzecim etapie tworzona jest koncepcja oświetlenia. Bazując na zebranych informacjach, wiedzy i doświadczeniu, projektant określa oczekiwany efekt oświetleniowy i przyjmuje ogólne wytyczne prowadzące do jego uzyskania. W tym celu określa rodzaj i klasę oświetlenia, typy opraw oświetleniowych i rodzaje źródeł światła, sposób ich rozmieszczenia, a także możliwość sterowania oświetleniem i wykorzystania światła dziennego. Następnym etapem jest realizacja wypracowanej koncepcji oświetlenia, polegająca na wielowariantowym rozpatrzeniu rozmieszczenia przestrzennego konkretnych typów opraw oświetleniowych. Czynności te, wykonuje się obecnie praktycznie wyłącznie z wykorzystaniem metod komputerowego wspomaganie projektowania. Ostatnim, piątym etapem jest zestawienie wyników projektowania, będące jego swoistym podsumowaniem, w którym szczegółowo określa się optymalne rozwiązanie lub warianty rozwiązań wypracowane w trakcie całego procesu [35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42]. Od projektowanego oświetlenia wymaga się spełnienia wielu kryteriów, które można sklasyfikować w kilku kategoriach [36, 35, 37]:

- oświetleniowe,
- psychologiczne,
- estetyczne,
- energetyczne,
- środowiskowe,
- ekonomiczne.

Należy podkreślić, że spośród wymienionych, to właśnie wymagania oświetleniowe mają nadrzędny charakter. Wynikają one z konieczności uwzględnienia podstawowych potrzeb człowieka: komfortu widzenia, wydolności wzrokowej oraz bezpieczeństwa. Spełnienie wymaganych kryteriów oświetleniowych prowadzi do wytworzenia we wnętrzu przyjaznego otoczenia świetlnego. Jest ono charakteryzowane przez takie parametry jak [35, 7]:

- natężenie oświetlenia,
- rozkład luminancji,

- kierunkowość światła,
- oddawanie barw i wygląd barwy światła (temperatura barwowa),
- zmienność światła w zakresie poziomym i barwy,
- olśnienie,
- migotanie³.

Parametry te dotyczą zarówno oświetlenia sztucznego jak i naturalnego. Jednakże samo wykorzystanie światła dziennego może być także traktowane jako niezależna cecha otoczenia świetlnego [35]. Prawidłowe oświetlenie ma wpływ na sprawność psychofizyczną i samopoczucie człowieka. Od natężenia oświetlenia i jego rozkładu w miejscu wykonywania zadania wzrokowego, w dużym stopniu zależy szybkość, bezpieczeństwo i komfort dostrzegania oraz podejmowanych przez człowieka działań [7, 43, 44, 45, 46].

Podczas projektowania nowych budynków biurowych, a także renowacji istniejących nie przywiązuje się wystarczającej uwagi do oświetlenia ich wnętrz. Najczęściej projektowanie oświetlenia rozpoczyna się, gdy podjęto już kluczowe decyzje dotyczące budynku [47]. W praktyce, projektant dysponuje zazwyczaj ograniczoną wiedzą o wyposażeniu, aranżacji i materiałach wykorzystywanych w pomieszczeniu. Układ stanowisk pracy często nie jest brany pod uwagę, ponieważ może się on zmieniać w trakcie eksploatacji obiektu. Jako podstawę projektu oświetlenia przyjmuje się więc przybliżony model pomieszczenia, uwzględniający jedynie podstawowe jego cechy, a oprawy są zazwyczaj rozmieszczane w postaci prostokątnej siatki [47, 48, 49, 50, 51, 52, 53]. W efekcie, w biurach często występują nieoptymalne warunki oświetleniowe. W niektórych obszarach przestrzeni oświetlenie bywa zbyt silne co może prowadzić do niepożądanego olśnienia, podczas gdy w innych obszarach zbyt mała ilość światła kreuje nieinspirujące i ciemne otoczenie. W obu przypadkach prowadzi to do zaburzenia czynności wzrokowych człowieka [54]. Niedostatek informacji podczas projektowania prowadzi także do nadmiernego przewymiarowania instalacji oświetleniowej (niewspółmiernego do eksploatacyjnej zmiany parametrów oświetlenia⁴), co skutkuje prześwieczeniem przestrzeni oraz wzrostem zużycia energii.

Obecnie, rozwój techniki świetlnej następuje przede wszystkim w obszarach wydajności energetycznej systemów oświetleniowych oraz kreowania komfortowego otoczenia świetlnego. Poza ciągłym rozwojem wysokosprawnych źródeł światła i układów zasilających, prowadzone w ostatnich latach prace badawcze dotyczą przede wszystkim metod sterowania oświetleniem [55].

³ Migotanie światła jest subiektywnym odczuciem zmian strumienia świetlnego, którego luminancja lub rozkład spektralny podlega zmianom w czasie [243, 246].

⁴ Eksploatacyjna zmiana parametrów oświetlenia wynika z oddziaływania wielu czynników m. in. procesów starzeniowych elementów opraw, postępującego zabrudzenia układów optycznych, zanieczyszczenia pomieszczenia, obniżenia się współczynników odbicia powierzchni, a także uszkodzeń źródeł światła i osprzętu. Wpływ części z tych czynników ogranicza się poprzez prowadzenie okresowych czynności konserwacyjnych.

1.2. Efektywność energetyczna

Obawy o emisję dwutlenku węgla, zmiany klimatyczne, degradację środowiska naturalnego oraz perspektywa wyczerpywania się zasobów paliw kopalnych spowodowały, że jednym z kluczowych wyzwań współczesnego świata jest problematyka zużycia energii. Jest ona przedmiotem intensywnych badań od czasu kryzysu energetycznego w latach 70. XX wieku. Od tego czasu nieustannie poszukuje się nowych źródeł energii, a także dąży do racjonalizacji jej zużycia poprzez kształtowanie nawyków odbiorców, a także aplikację nowoczesnych technologii – w tym m.in. powstanie i rozwój budynków typu *smart* [20, 56, 57, 58, 59, 20, 60, 61, 62].

Definicja efektywności energetycznej

Unia Europejska od lat prowadzi politykę energetyczną zmierzającą do poprawy efektywności energetycznej. Podstawowym aktem prawnym dotyczącym tej tematyki jest Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/27/UE z dnia 25 października 2012 r. w sprawie efektywności energetycznej [63] wraz z późniejszymi zmianami. W dokumencie tym zawarto definicję pojęcia efektywności energetycznej, które należy rozumieć jako „stosunek uzyskanych wyników, usług, towarów lub energii do wkładu energii”. Ponadto zdefiniowano pojęcie poprawy efektywności energetycznej, które oznacza „zwiększenie efektywności energetycznej w wyniku zmian technologicznych, zachowań lub ekonomicznych”. Tym samym, poprawę efektywności energetycznej można osiągnąć poprzez [31]:

- uzyskanie tego samego produktu przy obniżonym zużyciu energii,
- uzyskanie wzrostu produkcji przy niezmiennym zużyciu energii,
- uzyskanie wzrostu produkcji, który w kategoriach względnych, przewyższa wzrost zużycia energii.

Obecnie bardzo dużą uwagę poświęca się zagadnieniu efektywności energetycznej w budownictwie. Zatem w tym kontekście poprawę efektywności energetycznej można określić jako „proces zmierzający do obniżenia zużycia energii pierwotnej na etapie wytwarzania, przetwarzania, przesyłu, dystrybucji lub zużycia końcowego, spowodowanego postępowaniem technologicznym, zmianami zachowania lub zmianami ekonomicznymi, zapewniającego co najmniej taki sam (lub wyższy) poziom komfortu lub usług” [31].

Ograniczając rozważania do efektywności energetycznej instalacji oświetleniowej budynku, na potrzeby niniejszej pracy, definicję poprawy efektywności energetycznej oświetlenia przyjmuje się jako: obniżenie zużycia energii elektrycznej na cele oświetleniowe spowodowane postępowaniem technologicznym, zmianami zachowania, sposobu użytkowania lub zmianami ekonomicznymi, zapewniające wytworzenie

otoczenia świetlnego charakteryzującego się co najmniej takim samym (lub wyższym) poziomem komfortu.

Efektywność energetyczna budynków

Postęp techniczny i rozwój nowych technologii przyczynia się do poprawy komfortu życia ludzi. Towarzyszy temu nieustanny wzrost zapotrzebowania na energię – w przeciętnym polskim gospodarstwie domowym dekada 2002 – 2011 r. przyniosła 40% wzrost zużycia energii elektrycznej [64]. Szacuje się, że obecnie budynki konsumują 30–40% światowej produkcji energii ogółem oraz aż 60–65% produkcji energii elektrycznej (aspekt ten został szerzej opisany w rozdziale 2).

W ramach europejskiej polityki energetycznej, z uwagi na tak znaczący udział budynków w zużyciu energii, 19 maja 2010 r. opublikowano Dyrektywę Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/31/UE z dnia w sprawie charakterystyki energetycznej budynków (EPBD – *Energy Performance of Buildings Directive*) [34]. Zawarte w niej regulacje mają na celu znaczące ograniczenie zużycia energii oraz emisji gazów cieplarnianych, związanego ze wznoszeniem oraz eksploatacją budynków. Państwa członkowskie UE zostały zobowiązane, aby do dnia 30 grudnia 2020 r. wszystkie nowe budynki były budynkami o niemal zerowym zużyciu energii (NZEB – *nearly zero-energy buildings*). Zgodnie z późniejszymi zmianami [65] państwa te powinny także realizować strategię renowacji istniejących budynków, aby do 2050 r. w sposób racjonalny pod względem kosztów umożliwić ich przekształcenie w budynki NZEB.

W dyrektywie szczególną uwagę poświęcono systemowi certyfikacji energetycznej budynków. Zdefiniowano pojęcie charakterystyki energetycznej budynku, które oznacza obliczoną lub zmierzoną ilość energii potrzebnej do zaspokojenia zapotrzebowania na energię związanego z typowym użytkowaniem budynku, która obejmuje m.in. energię na potrzeby ogrzewania, chłodzenia, wentylacji, ciepłej wody i oświetlenia. Ustanowiono także, że minimalne wymagania dotyczące charakterystyki energetycznej budynków, obowiązują zarówno w odniesieniu do nowych budynków jak i tych istniejących, które podlegają istotnej renowacji, a także systemów technicznych w budynkach, jeżeli są one instalowane, wymieniane lub modernizowane. Narzędziem umożliwiającym porównanie i ocenę charakterystyk energetycznych różnych budynków są świadectwa charakterystyki energetycznej.

Ze względu na skalę oddziaływania budynków na światowe zużycie energii i zmieniające się uwarunkowania prawne, energooszczędność jest obecnie kluczowym wyzwaniem dla przemysłu budowlanego. Dążąc do racjonalizacji zużycia energii w budynkach poszukuje się rozwiązań na każdym etapie ich budowy i eksploatacji.

Czynnikami decydującymi o energochłonności budynku są przede wszystkim [66, 67, 68, 58, 69, 70, 31, 71, 72, 73]:

- warunki klimatyczne,
- cechy konstrukcyjne i przestrzenne budynku (izolacyjność cieplna przegród zewnętrznych i wewnętrznych, zwartość bryły, usytuowanie względem stron świata, rozmiary i rozmieszczenie okien, pojemność cieplna budynku itp.),
- rozwiązania techniczne instalacji odbiorczych, zastosowanie wysokosprawnych źródeł ciepła/chłodu, obecność i funkcje systemu automatycznego sterowania,
- kryteria projektowe mikroklimatu wewnątrz (m.in. temperatura, wilgotność, jakość powietrza, oświetlenie),
- sposób eksploatacji i utrzymania budynku,
- zachowanie użytkowników (rozumiane jako obecność i interakcja z instalacjami technicznymi budynku lub absencja).

Ze względu na rosnące wymagania w zakresie energooszczędności budynków [74], które są niemożliwe do spełnienia jedynie poprzez cechy konstrukcyjne budynku, zwraca się coraz większą uwagę na efektywność energetyczną instalacji odbiorczych, stosowanie w budynkach systemów automatyki i sterowania, a także lokalną generację energii z wykorzystaniem źródeł odnawialnych [65]. Z przytoczonej definicji charakterystyki energetycznej budynku, a także zapisów normy PN-EN 15232 [33], wynika że instalacjami technicznymi budynku, które mają decydujący wpływ na jego efektywność energetyczną są:

- instalacja grzewcza,
- instalacja chłodnicza,
- instalacja ciepłej wody użytkowej,
- instalacja wentylacji i klimatyzacji,
- oświetlenie,
- przesłony przeciwsłoneczne (łamacze światła).

Efektywność energetyczna instalacji oświetleniowej

Biorąc pod uwagę moc zainstalowaną, oświetlenie elektryczne nie stanowi znaczącego odbioru w typowym budynku. Rozważając jednak profil zużycia energii ogółem przez cały obiekt szacuje się, że oświetlenie ma w nim 20–40% udział, a biorąc pod uwagę profil zużycia samej tylko energii elektrycznej udział ten wynosi 19–50%. W budynkach biurowych wartości te sięgają odpowiednio 14–40% oraz nawet 20–60% (aspekt ten został szerzej opisany w rozdziale 2). Na tej podstawie, można stwierdzić, że instalacja oświetleniowa stanowi obszar o znaczącym wpływie na bilans energetyczny całego budynku, a zwłaszcza budynku biurowego.

Szczególnie intensywne eksploataowanie oświetlenia ma miejsce w budynkach biurowych. Wynika to zarówno z charakteru pracy biurowej, wymagającej wytworzenia warunków oświetleniowych odpowiednich dla intensywnej pracy wzrokowej ludzi, jak

i znacznej rozpiętości czasowej funkcjonowania obiektu w ciągu doby. Ze względu na niewystarczającą ilość światła dziennego, przyzwyczajenia pracowników, bądź brak systemów automatycznego sterowania, oświetlenie elektryczne uruchomione rano, zazwyczaj pozostaje włączone przez cały dzień, niezależnie od warunków atmosferycznych czy pory roku [75, 76, 44, 77, 78, 79, 80, 70, 20, 81].

Na konieczność obniżenia zapotrzebowania energii przez oświetlenie, zwrócono uwagę już w latach 70. XX wieku, kiedy świat zmagał się ze skutkami kryzysów paliwowych [82]. W latach 80. W Stanach Zjednoczonych wypracowano pierwsze zalecenia związane z efektywnością energetyczną oświetlenia wewnątrz [82]. Należy podkreślić, że oświetlenie ma przede wszystkim służyć człowiekowi, poprzez zapewnienie optymalnych warunków wykonywania czynności wzrokowych. Dlatego, jakiegokolwiek działania zmierzające do obniżenia energochłonności, nie mogą odbywać się kosztem wzrokowych aspektów instalacji oświetleniowej [15, 83, 47, 32]. Oszczędności energii powinny być natomiast efektem [15, 84, 85, 32]:

- doskonalenia sprawności instalacji oświetleniowej (stosowania źródeł światła o wysokiej skuteczności świetlnej oraz wysokosprawnych układów zasilających i optycznych),
- wzrostu świadomości użytkowników w zakresie gospodarowania energią i zmiany nawyków dotyczących sposobu użytkowania oświetlenia,
- pełnego wykorzystania światła naturalnego,
- dostosowywania warunków oświetlenia do zachowania lub obecności użytkowników,
- stosowania systemów automatycznego sterowania oświetleniem,
- doskonalenia charakterystyk utrzymania stanu technicznego instalacji oświetleniowej.

Ocenia się, że w krajach rozwiniętych około 75% instalacji oświetlenia wewnątrz jest przestarzałych w odniesieniu do obecnego stanu techniki i wiedzy [86]. Warto także zauważyć, że koszty cyklu całego cyklu życia instalacji oświetleniowej wynikają aż w 70% z zużycia energii elektrycznej, a jedynie w 15% z kosztów inwestycyjnych. Podobnie, najbardziej znaczący wpływ na środowisko naturalne (szacunkowo 80–90%) wywiera praca instalacji oświetleniowej [87]. W związku z tym modernizacja instalacji oświetleniowej jest postrzegana jako jeden z najbardziej obiecujących i opłacalnych środków oszczędzania energii [86].

W ramach modernizacji wymienia się źródła światła i oprawy na bardziej energooszczędne, a także wdraża systemy automatycznego sterowania oświetleniem. Szczególną łatwość i stosunkowo niski koszt implementacji nowoczesnych rozwiązań z zakresu energooszczędnych systemów automatycznego sterowania oświetleniem, dzięki infrastrukturze tzw. inteligentnej instalacji elektrycznej, stwarzają budynki typu *smart*. Dlatego też, rozważania prowadzone w niniejszej pracy będą dotyczyły tego typu obiektu.

1.3. Budynek typu *smart*

Obecnie ludzkość wkracza w etap dziejów, który można określić erą „*smart*”. W ostatnich latach dynamiczny rozwój technologii spowodował, że w wielu dziedzinach życia wykorzystywane są technologie informatyczne, systemy komunikacji i automatyki. W codziennym życiu, coraz częściej mamy do czynienia z przedmiotami lub obiektami określanymi jako *smart*. Przykładami mogą być istniejące już telefony komórkowe (*smartphone*), a także wznoszone budynki (*smart buildings*) – w przyszłości mające zostać włączone w infrastrukturę miasta typu *smart* (*smart city*). W elektroenergetyce rozwój zmierza w kierunku systemów pomiarowych (*smart metering*) oraz sieci elektroenergetycznych typu *smart* (*smart grid*) [56]. Powstanie i rozwój budownictwa typu *smart* jest nierozdzielnie związane z rozwojem tzw. inteligentnych instalacji elektrycznych – dzięki nim możliwe stało się nie tylko zasilanie urządzeń zamontowanych w budynkach, ale także ich automatyczne sterowanie.

Nowoczesne instalacje elektryczne typu *smart*

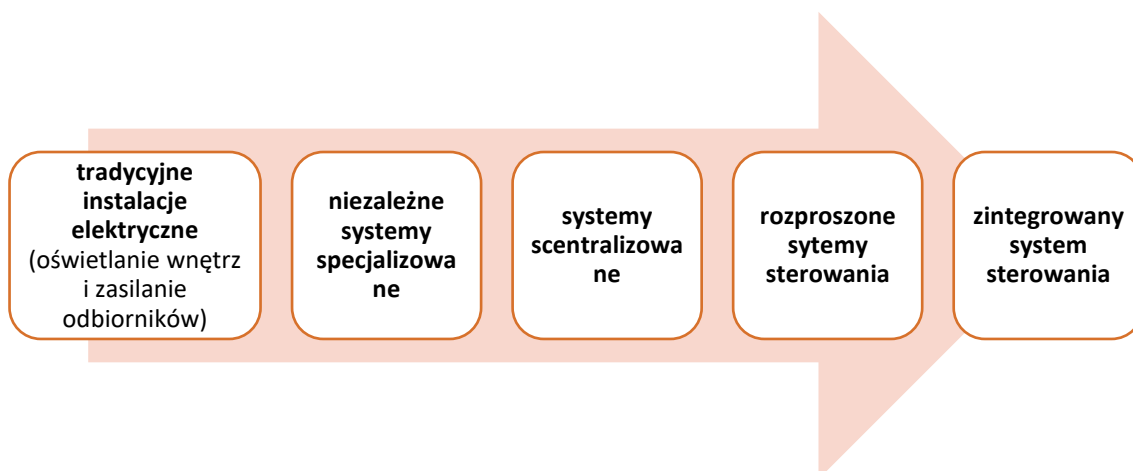
Zadaniem pierwszych instalacji elektrycznych w budynkach było oświetlenie wewnątrz oraz zasilanie odbiorników elektrycznych. Z czasem, tradycyjną funkcjonalność instalacji elektrycznych zaczęto rozszerzać w kierunku automatycznego sterowania urządzeń w budynkach i zakładach przemysłowych (patrz rysunek 1). Pierwsze zastosowania nowej technologii wykorzystywały proste układy automatyki stycznikowo-przełącznikowej. Następnie, wraz z dynamicznym rozwojem techniki cyfrowej zaczęto wykorzystywać układy elektroniczne, tworząc niezależne, wyspecjalizowane instalacje obsługujące wydzielone funkcje (np. alarmowanie, klimatyzacja czy oświetlenie). Istotną wadą tego rozwiązania jest ograniczona funkcjonalność niewspółpracujących ze sobą systemów. Ponadto, z uwagi na mnogość niezależnych instalacji, wysoki stopień automatyzacji wymaga znacznych nakładów finansowych na etapie inwestycji (własne okablowanie i czujniki, liczne urządzenia sterujące), a późniejsza konserwacja systemów jest kłopotliwa. Dlatego też, w celu poprawy funkcjonalności, a także obniżenia kosztów dążono do połączenia niezależnych instalacji w jeden wspólny system. Doprowadziło to do opracowania systemów scentralizowanych, w którym funkcje nadzoru i sterowania wszystkimi systemami w budynku – uprzednio realizowane przez niezależne instalacje – powierzono centralnemu komputerowi o dużej mocy obliczeniowej. Zasadniczą wadą takiego rozwiązania była jednak groźba awarii mogącej sparaliżować funkcjonowanie całego obiektu. Kolejnym etapem rozwoju było wprowadzenie rozproszonych systemów sterowania, wykorzystujących liczne urządzenia wyposażone w procesory oraz pamięć. W oparciu o własny program umożliwiły one autonomiczne, lokalne przetwarzanie informacji i sterowanie, a także wymianę informacji z innymi urządzeniami w sieci sterowania za pośrednictwem dedykowanej magistrali

komunikacyjnej. Rozwiązanie to zapewniło znacznie wyższy poziom niezawodności. Następnym etapem rozwoju było wprowadzenie standardów komunikacji, które umożliwiło pełną integrację systemów rozproszonych. W ten sposób powstały zintegrowane systemy sterowania, których zadaniem jest zarządzanie wszystkimi (do tej pory niezależnymi) systemami budynku i reagowanie na zmieniające się uwarunkowania zewnętrzne i wewnętrzne. Ważnym kierunkiem rozwoju jest koncepcja Internetu Rzeczy (*Internet of Things* - IoT), która zakłada wykorzystanie technologii sieci IT i protokołu IP dla coraz głębszej integracji instalacji technologicznych i urządzeń wykorzystywanych w budynkach i otoczeniu człowieka [56, 31, 88].

Współcześnie w wielu budynkach takich jak biurowce, galerie handlowe, uczelnie, szpitale czy budynki mieszkalne, poza tradycyjnymi instalacjami elektrycznymi zasilającymi różnego typu odbiorniki, funkcjonują instalacje, które ze względu na pełnione funkcje można przyporządkować do trzech podstawowych grup [56, 31]:

- system automatyzacji budynku – BAS (*Building Automation System*), zarządzający funkcjami technicznymi budynku,
- system zarządzania bezpieczeństwem – SMS (*Security Management System*), nadzorujący systemy bezpieczeństwa,
- system zarządzania energią – EMS (*Energy Management System*), dysponujący zasobami energii i mediów nadzorujący ich zużycie.

Instalacje te mogą być zorganizowane jako niezależne, wyspecjalizowane systemy automatycznego sterowania, bądź jako scentralizowane, rozproszone lub zintegrowane systemy automatycznego sterowania [89, 90, 66, 91, 56, 31, 88].



Rysunek 1. Proces rozwoju instalacji elektrycznych: od instalacji tradycyjnych do nowoczesnych instalacji typu smart.

Idea budownictwa typu *smart*

Idea tzw. budynku inteligentnego narodziła się w latach 70-tych XX wieku. Początkowo skupiano się na automatyzacji procesów w zakładach przemysłowych oraz

optymalizacji wydajności ekonomicznej firm. W latach 80-tych rozwijającą się technologię zaadaptowano na potrzeby budownictwa użyteczności publicznej oraz mieszkalnego. Na początku lat 80. zdefiniowano po raz pierwszy termin „inteligentny budynek” (Instytut Inteligentnych Budowli w Waszyngtonie – USA) [89, 92], a w 1983 r. oddano do użytku pierwszy w historii budynek, który określano tym mianem – The City Place Building w Hatford (USA) [93, 94].

Z czasem – wraz z rozwojem technologii i zmieniających się potrzeb – ewoluowało znaczenie pojęcia „inteligentny budynek”. W różnych regionach świata wypracowano wiele definicji i interpretacji tego terminu, które do tej pory nie zostały ujednolicone [93, 89, 95, 96, 97, 93, 92]. Obecnie, mianem „budynku inteligentnego” (typu *smart*) można określić obiekt, który w sposób zintegrowany, efektywnie zarządza zasobami, usługami i ich wzajemnymi powiązaniem w celu zaspokajania zmieniających się potrzeb użytkowników, przy jednoczesnej minimalizacji kosztów i ciągłym poszanowaniu środowiska naturalnego [56].

Warto podkreślić, że tak popularne i powszechnie używane w dzisiejszych czasach określenie „inteligentny budynek”, obecne również w języku angielskim (*intelligent building*), nie może być interpretowane dosłownie, gdyż inteligencją cechują się jedynie istoty żywe [93]. Podobnie jest w przypadku instalacji technicznych budynku, często określanych jako inteligentne. Obecnie tzw. budynki inteligentne, pod względem liczby rejestrowanych informacji i wykonywanych czynności, w czysto ilościowym rozumieniu dorównują możliwościom człowieka. Jednakże cechą odróżniającą je od istot inteligentnych są ubogie procesy wewnętrzne. System sterowania budynkiem korzysta z zaprogramowanych algorytmów sterowania i podejmuje decyzje na ich podstawie, przy wykorzystaniu danych historycznych, a więc jedynie odtwarza inteligencję projektantów. W tym kontekście, określenie anglojęzyczne „*smart*” (mądry, sprytny), wydaje się być bardziej adekwatnym mianem dla budynku wyposażonego w systemy automatycznego sterowania [98, 99, 100]. W trwającej dyskusji naukowej proponowane są także inne określenia tego typu budynków, takie jak budynki odczuwające (*sentient*), hybrydowe (*hybrid*) lub – w odniesieniu do domów wykorzystujących automatykę – domotyczne (*domotic*) [92]. W dalszej części tej pracy zdecydowano się na używanie określenia typu *smart* w odniesieniu do budynków, systemów i instalacji technicznych.

Początkowo działanie systemów automatycznego sterowania w budynkach koncentrowało się przede wszystkim na aspektach komfortu użytkownika obiektu. Z czasem, dzięki rozwojowi technologii poprawie uległa niezawodność i szybkość komunikacji urządzeń automatyki budynkowej, co umożliwiło integrację funkcji bezpieczeństwa oraz zarządzania zużyciem energii. Spowodowało to otwarcie nowych obszarów oddziaływania systemów automatycznego sterowania w obszarach optymalizacji zużycia energii oraz kosztów użytkownika budynku. Ponieważ podstawową rolą budynku jest zapewnienie komfortu i bezpieczeństwa jego użytkownikom [48], bardzo ważne jest zachowanie równowagi pomiędzy tymi

aspektami, a energooszczędnością. Z tego powodu funkcje minimalizujące zużycie energii powinny być realizowane przy jednoczesnym zachowaniu komfortu i bezpieczeństwa użytkownika budynku na odpowiednim poziomie [90, 66, 101, 102, 103, 104, 58, 55].

W ostatnich latach, między innymi za sprawą zmian prawnych, pogoń za efektywnością energetyczną zdominowała podejście do projektowania budynków oraz stała się jednym z głównych czynników stymulujących rozwój idei budownictwa typu *smart* [56, 105]. Idea ta nieustannie i dynamicznie się rozwija, wciąż tworząc nowe obszary zastosowań [101, 106, 103, 107]. Obecnie, coraz częściej poszukuje się rozwiązań zorientowanych na użytkownika i jego potrzeby, gdyż tylko przy wysokim poziomie satysfakcji użytkowników oraz ich pełnej akceptacji dla systemów automatycznego sterowania można osiągnąć wysoką efektywność energetyczną budynku. Na czynniki te, jako niezbędne dla dalszego rozwoju systemów automatycznego sterowania zwrócono uwagę w wielu publikacjach [80, 108, 109, 77, 110]. W efekcie, w ostatnich latach powstała idea sterowania zorientowanego na użytkownika (*occupant centered control*) [111, 112, 113, 114]. Jej celem jest tworzenie adaptacyjnych systemów automatycznego sterowania, dostosowujących się do użytkowników poprzez rozpoznanie ich zwyczajów, zachowań, potrzeb, odczuć i cech psychofizycznych. Podejście to jest przeciwieństwem dotychczas stosowanego, w którym użytkownik był marginalizowany i zmuszony do dostosowania się do zaprojektowanego systemu sterowania [115, 116]. W szerszej perspektywie, zorientowanie na użytkownika leży także u podstaw idei zarządzania jakością środowiska wewnętrznego (*environmental quality management – EQM*) [117]. Zakłada ona zintegrowane projektowanie budynków zorientowane na ludzi oraz osiąganie przez nie wysokiej efektywności energetycznej, w wyniku dbałości o wysokiej jakości środowisko wewnętrzne budynku.

Nowoczesna instalacja oświetleniowa

W ciągu ostatnich 15 lat, w technice świetlnej nastąpił ogromny postęp – zarówno w obszarze samych źródeł światła jak i systemów automatycznego sterowania oświetleniem [118]. Tradycyjnie funkcjonalność instalacji oświetleniowej ogranicza się do realizacji funkcji oświetlania [119, 120]. Instalacje oświetleniowe nowej generacji – typu *smart*, oferują ponadto dodatkowe funkcje, takie jak np. możliwość automatycznego dostosowywania strumienia światła sztucznego do zmiennego natężenia oświetlenia wywołanego światłem dziennym lub bieżących potrzeb użytkowników [119, 121]. Zatem instalacje oświetleniowe typu *smart* umożliwiają optymalizację nie tylko efektywności energetycznej, ale także warunków oświetleniowych w pomieszczeniu [83].

Wysoki potencjał energooszczędności, który charakteryzuje systemy automatycznego sterowania oświetleniem spowodował wzrost zainteresowania tymi

technologiami. Systemy te są wymieniane w normach europejskich jako sposób na poprawę efektywności energetycznej oświetlenia w budynkach [118].

Obecnie celem rozwoju instalacji oświetleniowych typu *smart* jest opracowanie systemów, które [122, 96, 106, 123, 119, 124, 95, 16, 66, 125]:

- realizują funkcję oświetlania, tworząc ergonomiczne warunki pracy wzrokowej oraz komfortowe warunki podczas odpoczynku,
- reagują na zachowania użytkowników – dostosowując warunki oświetleniowe do ich obecności lub rodzaju wykonywanego zadania wzrokowego,
- uwzględniają indywidualne potrzeby użytkowników, dostosowując warunki oświetleniowe do ich bieżących preferencji,
- wykorzystują światło dzienne, dynamicznie reagując na jego zmienność w celu kompensowania niedoborów światła naturalnego,
- umożliwiają aranżowanie scen świetlnych,
- pozytywnie oddziałują na organizm człowieka w zakresie efektu biologicznego niewizualnego, poprzez np. zmiany w natężeniu oświetlenia lub temperaturze barwowej,
- realizują funkcję raportowania, informując o zużyciu energii oraz zaistniałych awariach,
- oferują intuicyjną obsługę i komunikację, również dla nieobytych z techniką użytkowników,
- funkcje sterowania realizują niezwłocznie i niezawodnie,
- charakteryzują się niskim poziomem „nachalności” – działania systemu realizowane są w sposób, który nie powoduje dyskomfortu użytkowników; obecność systemu sterowania powinna pozostawać „niezauważalna” dla użytkowników,
- umożliwiają zdalne sterowanie,
- dzięki integracji z systemem ruchomych przeston zaciemniających, umożliwiają dostosowanie ilości światła dziennego, np. w celu ograniczania olśnienia,
- symulują w sposób nieszablonowy zachowania użytkownika podczas jego nieobecności realizując funkcję systemu bezpieczeństwa,
- wykorzystują dostępne odnawialne źródła energii.

Obecnie z powodzeniem stosowane są różnego typu metody sterowania instalacją oświetleniową, których celem jest obniżenie zużycia energii. Według literatury, w pomieszczeniach biurowych umożliwiają one osiągnięcie oszczędności energii nawet do 68% w odniesieniu do instalacji oświetleniowej sterowanej manualnie [126], przy spełnieniu wymagań świetlnych określonych w normie. Warto podkreślić, że oszczędności te są efektem wyłącznie działania systemu automatycznego sterowania i są niezależne od obniżenia zużycia energii wynikającego z zastosowania energooszczędnych źródeł światła.

Wytyczne dotyczące natężenia oświetlenia w miejscach pracy zawarte w normie PN-EN 12464-1:2012 [7] stanowią pewien kompromis między zapewnieniem

komfortowych warunków widzenia, a kwestiami ekonomicznymi, technicznymi i środowiskowymi [11, 127]. Dotychczas prowadzone badania pokazują, że ludzie cechują się odmiennymi preferencjami oświetleniowymi, które ponadto są zmienne w zależności od rodzaju wykonywanego zadania wzrokowego lub stanu psychofizycznego [128, 129, 130, 131, 53, 132]. Ponieważ komfort oświetleniowy człowieka jest subiektywny, dlatego nie istnieje jedno natężenie oświetlenia, które może usatysfakcjonować wszystkich, podobnie jak jedna temperatura powietrza nie zapewni wszystkim komfortu cieplnego [80, 133]. W związku z tym odgórne sterowanie oświetleniem, którego priorytetem jest jedynie spełnienie norm oraz minimalizacja zużycia energii, nie jest optymalne z punktu widzenia użytkownika.

Rozważając wprowadzenie do budynków systemów automatycznego sterowania, należy zwrócić uwagę na zagrożenie odrzucenia technologii przez użytkowników. Brak akceptacji systemów automatycznego sterowania przez użytkowników prowadzi do ich wyłączenia, co powoduje nierealizowanie celów sterowania i w konsekwencji skutkuje podniesieniem zużycia energii. Nawet najbardziej energooszczędne systemy nie będą skuteczne jeżeli zostaną wyłączone przez użytkowników. Rozważając efektywność energetyczną oświetlenia, należy podkreślić, że jego rolą jest przede wszystkim zaspokojenie potrzeb wzrokowych człowieka. Zatem wzrokowe aspekty instalacji oświetleniowej są nadrzędne, a oszczędności energii nie mogą być realizowane ich kosztem.

Udostępnienie instalacji oświetleniowej, która umożliwi każdemu użytkownikowi wybór preferowanego natężenia oświetlenia na własnym stanowisku pracy, będzie prowadziło do poprawy komfortu i satysfakcji użytkowników [110]. Sterowanie takie, dzięki precyzyjnemu kierowaniu strumieni energii według zapotrzebowania, stwarza także potencjał obniżenia zapotrzebowania energii na cele oświetleniowe.

1.4. Teza i cele pracy

Rozwój integracji systemów automatyki i sterowania w obszarze zasilania urządzeń elektrycznych stanowi dzisiaj jeden z głównych obszarów rozwoju inżynierii elektrycznej [56]. 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 zostaną 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 użytkowania 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*.

Struktura pracy

Praca składa się z 6 rozdziałów, włączając niniejszy rozdział. W pracy zawarto opisy analiz, badań symulacyjnych, ankietowych i doświadczalnych prowadzonych z wykorzystaniem infrastruktury Małopolskiego Laboratorium Budownictwa Energooszczędnego. Badania metody lokalnego, spersonalizowanego sterowania oświetleniem ogólnym, wykonano w oparciu o wybrane pomieszczenie doświadczalne wyposażone w indywidualnie sterowane lampy LED, którego charakterystyka oraz przyjęte rozmieszczenie stanowisk pracy są typowe dla nowoczesnych biur typu *open space*.

Na początku rozdziału 2 pokazano znaczący udział budynków w światowym zużyciu energii. Następnie wykazano, że oświetlenie stanowi obszar o znacznym wpływie na bilans energetyczny całego budynku, zwłaszcza biurowego. Przedstawiono czynniki decydujące o energochłonności oświetlenia wewnątrz oraz opisano nowoczesne źródła światła LED, których zastosowanie będzie przedmiotem dalszych rozważań w tej pracy. Scharakteryzowano zintegrowany system sterowania i automatyzacji budynku typu *smart* w kontekście jego oddziaływania na efektywność energetyczną budynku. Zwrócono również uwagę na aspekt akceptacji systemów automatycznego sterowania przez ludzi. Następnie przedstawiono opis biur na planie otwartym (typu *open space*), których oświetlenie będzie rozważane w dalszej części pracy, zagadnienie schematów obecności ludzi w przestrzeniach biurowych oraz przeprowadzono identyfikację metod sterowania oświetleniem, mających na celu poprawę efektywności energetycznej. 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 zarówno zużycia energii jak i warunków oświetleniowych w wielkopowierzchniowych

przestrzeniach biurowych. Scharakteryzowano również różne metody sterowania oświetleniem oraz przeprowadzono metaanalizę uzyskiwanych z ich wykorzystaniem oszczędności energii na oświetlenie w biurach.

W kolejnym rozdziale pracy, przedstawiono obecne rekomendacje dotyczące oświetlenia biurowych stanowisk pracy. Następnie, na podstawie analizy wyników badań opisywanych w literaturze pokazano, że indywidualne preferencje oświetleniowe ludzi są zróżnicowane, a w środowiskach biurowych znacząca liczba osób preferuje natężenie oświetlenia niższe niż rekomendowane. Podkreślono także, że natężenie oświetlenia stanowi najistotniejszy czynnik oceny otoczenia świetlnego. Opisano również charakterystykę pomieszczeń Małopolskiego Laboratorium Budownictwa Energooszczędnego, które wybrano na potrzeby doświadczalnych badań własnych opisywanych w dalszej części rozprawy. Uzupełnienie opisu stanowią wyniki pomiarów wybranych parametrów charakteryzujących jakość oświetlenia w rozważanych pomieszczeniach. W pracy przedstawiono także wyniki ankietowych badań własnych przeprowadzonych w pomieszczeniu doświadczalnym, którego uczestnicy oceniali warunki oświetleniowe w nowoczesnych biurach, wytworzone zgodnie z obowiązującymi rekomendacjami. Ponieważ znacząca liczba osób preferowała niższe natężenie oświetlenia uzyskano potwierdzenie, że udostępnienie użytkownikom możliwości indywidualnej regulacji oświetlenia stanowisk pracy, będzie zapewniało dodatkowe oszczędności energii podczas ich obecności.

W dalszej części pracy (rozdział 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. Następnie autor zaproponował koncepcję metody spersonalizowanego, lokalnego sterowania oświetleniem ogólnym, która łączy regulację indywidualną oraz sterowanie od zajętości poszczególnych stanowisk pracy. W oparciu o dotychczasowe rozważania, przeanalizowano problematykę tego typu sterowania w biurach typu *open space*. Opisano proces doboru modelu pomieszczenia doświadczalnego, który będzie wykorzystywany na potrzeby symulacji różnych wariantów pracy systemu spersonalizowanego sterowania oświetleniem ogólnym. W kolejnej części pracy zawarto szczegółowe wytyczne dla osiągnięcia docelowych warunków oświetleniowych w pomieszczeniach, w wyniku działania proponowanej metody sterowania. Na potrzeby określania wynikowych natężeń oświetlenia na poszczególnych stanowiskach przy sterowaniu lampami w układzie otwartym, na przykładzie pomieszczenia doświadczalnego przedstawiono dwa modele matematyczne systemu oświetlenia: liniowy (metoda modelowania analitycznego) oraz nieliniowy (metoda modelowania z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych). Następnie zaproponowano adekwatne, dwie metody optymalizacji

problemu spersonalizowanego sterowania oświetleniem w otwartej przestrzeni biurowej przy minimalnym zużyciu energii. Rezultatem ich zastosowania są zestawy optymalnych współczynników ściemnienia poszczególnych lamp. Zamieszczono również wyniki badań symulacyjnych i doświadczalnych metody spersonalizowanego sterowania oświetleniem ogólnym, które przeprowadzono na przykładzie pomieszczenia doświadczalnego dla wybranych stanów pracy systemu oświetleniowego. W szczególności pokazano przykłady optymalnych rozwiązań oraz rezultaty analizy wpływu proponowanej metody na obniżenie zużycia energii na oświetlenie w otwartej przestrzeni biurowej.

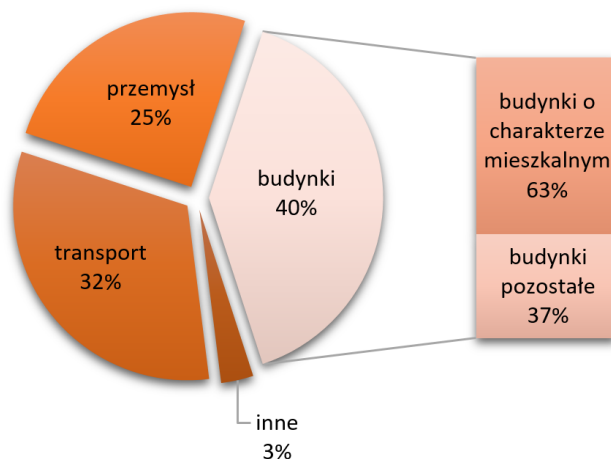
W rozdziale 5 zawarto założenia i wytyczne do ustawień oświetlenia w otwartej przestrzeni biurowej, z wykorzystaniem nowoczesnych instalacji elektrycznych stosowanych w budynkach biurowych typu *smart*. Wytyczne te, przedstawiono w kontekście celów realizowanych w ramach metody spersonalizowanego sterowania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

W rozdziale 6 podsumowano rozważania przeprowadzone w rozprawie, uzasadniono znacznie przeprowadzonych badań oraz osiągnięcie założonych celów, a także wskazano kierunki dalszych badań.

2. Analiza możliwości poprawy efektywności energetycznej pracy instalacji oświetleniowej, z wykorzystaniem nowoczesnej instalacji elektrycznej stosowanej w budownictwie biurowym typu *smart*

Udział budynków w światowym zużyciu energii

Szacuje się, że na świecie około 30% [72] 30–40% [134] lub 40% energii [135, 136, 137, 60, 138] i od 60% [137] do 65% [136] energii elektrycznej jest konsumowanej w budynkach. W Unii Europejskiej udział budynków w ogólnym wykorzystaniu energii wynosi 40%. Dla porównania transport pochłania 32%, a przemysł 25% (patrz rysunek 2) [139, 140, 141, 34, 63, 56]. Budynki mają znaczący udział w narodowym zużyciu energii w wielu krajach: 23% w Hiszpanii, 24% w Korei Południowej [142], 25% w Japonii, 28% w Chinach, 39% w Wielkiej Brytanii, 42% w Brazylii, ponad 47% w Botswanie, 47% w Szwajcarii [59, 69]. W Stanach Zjednoczonych budynki konsumują 41% ogółu energii i 72% wytwarzanej energii elektrycznej [137]. W Portugalii wartości te wynoszą odpowiednio 30% i 60% [143]. W Egipcie 43% całkowitego zużycia energii elektrycznej przypada na sektor budowlany [144].



Rysunek 2. Zużycie energii w Unii Europejskiej.

Rozważając jedynie budynki komercyjne, okazuje się że mają one znaczący udział w zużyciu energii przez cały sektor budowlany. W Unii Europejskiej około 15% wyprodukowanej energii jest konsumowanej w tego typu obiektach [59, 56]. W poszczególnych krajach dane te prezentują się następująco: 8% w Hiszpanii, 11% w Wielkiej Brytanii, 17% w Chinach [59, 69]. W Stanach Zjednoczonych od około 18% [145, 125] do 19% [146] narodowej produkcji energii jest zużywanej w budynkach

komercyjnych, a nawet od 61% [125] do 76,7% [145] tej energii stanowi energia elektryczna. Rozważając samą energię elektryczną, budynki komercyjne odpowiadają odpowiednio za od 35% [77] do 36% [125] jej zużycia w Stanach Zjednoczonych.

2.1. Zapotrzebowanie na energię przez oświetlenie wnętrz

Szacuje się, że oświetlenie przyczynia się w przybliżeniu do 7,2% [147], 15% [135], 18–21% [24], 19% [148] lub 20% [24, 149, 150, 80, 151, 152, 57] zużycia energii na świecie. W USA udział oświetlenia w narodowym zużyciu energii wynosi 7% [147], w Szwecji 10% [87], a we Włoszech 16,4% [147, 153]. Biorąc pod uwagę samą energię elektryczną produkowaną na świecie, oświetlenie ma od 19% [144, 147, 154, 28, 32, 53], 20% [57, 86], do 20–30% [155] udziału w jej zużyciu. W krajach uprzemysłowionych do oświetlania wykorzystuje się 5–15% wytwarzanej energii elektrycznej [156]. W USA oświetlenie zużywa jej od 10% [157] do 18% [153], w Unii Europejskiej 14% [154], w Indiach niemal 20% [24], w Szwecji 23% [153], a w Wielkiej Brytanii 20% [158].

Rozważając profil energetyczny budynków, szacuje się, że oświetlenie jest odpowiedzialne za 20–35% [159, 160], 23% [145] lub 20–40% [161] całkowitego zużycia energii, a także od 19% [162], 20–40% [163], 38% [159], 30–40% [31], do 25–50% [164] zużycia energii elektrycznej. W USA oświetlenie odpowiada za średnio 14% zużycia energii przez budynki mieszkalne i komercyjne [165]. W szkołach bez wentylacji mechanicznej zużycie energii na cele oświetleniowe może stanowić nawet do 70% zużycia energii elektrycznej przez budynek [166]. W Europie, w średnich i dużych budynkach około 40% energii elektrycznej jest przeznaczanej na cele oświetleniowe [167, 168].

W budynkach komercyjnych, systemy oświetleniowe mają udział od 10% [146], 20% [113] do 25–35% [169] w całkowitym zapotrzebowaniu na energię przez budynek. W Unii Europejskiej udział ten szacuje się na 14% [112], w Kanadzie na 10% [147] do 15% [77], w Wielkiej Brytanii na 21% [85], a w USA od 14 [168], 15% [77], 20,2% [170], 25% [112], 30% [171] do 20–38% [172]. Ograniczając rozważania do samej energii elektrycznej, oświetlenie w budynkach komercyjnych pochłania jej 20–30% [173], 35% [174, 175] lub nawet 20–45% [147, 87]. W USA udział ten określa się na 17% [146, 125], 33% [83], 38% [176], 20–40% [177], lub 25–40% [146, 178], w Malezji na 19% [49, 179], w Szwajcarii na niemal 24% [111], w Kanadzie na 24% [147], w Hong Kongu (Chiny) na 20–30% [180, 181, 182], w Szwecji na 25–30% [87], a w Hiszpanii na 31,4% [143].

Biurowce stanowią najliczniejszą grupę obiektów wśród budynków komercyjnych (około 18 % udziału) [146]. Za zużycie energii w typowym budynku biurowym odpowiadają przede wszystkim systemy oświetlenia oraz wentylacji, ogrzewania i chłodzenia (*HVAC – heating, ventilation, air conditioning*). W 2014 roku Międzynarodowa Agencja Energetyczna podkreśliła, że w tego typu budynkach

oświetlenie sztuczne jest największym konsumentem energii, nawet w porównaniu do systemów ogrzewania i chłodzenia, co wynika ze specyfiki funkcjonowania biurowców [55]. Rozważając jedynie budynki biurowe, ocenia się, że ich oświetlenie pochłania od 25% [183], 25–35% [184, 152, 168] do 40% [185, 57] ogółu zużywanej przez nie energii. We Francji jest to 14% [186], w Wielkiej Brytanii 17% [59], w USA ponad 20% [187], 22% [59] lub 25% [53], w Korei Południowej 30% [188], w Hiszpanii 33 [59], a w Chinach 20–40% [189]. Ponadto, na cele oświetleniowe jest przeznaczane, 20–45% [87], 35% [154], 40% [166] lub nawet 20–60% [190, 191] całkowitego zużycia energii elektrycznej w budynkach biurowych. W Unii Europejskiej jest to 21% [192], w USA 39% [53], w dużych budynkach biurowych w Chinach 20–40% [83], a w Wielkiej Brytanii w biurach bez wentylacji mechanicznej ponad 40% [85].

W przeciwieństwie do miejsc pracy, w budownictwie mieszkalnym oświetlenie elektryczne nie jest normowane⁵. Charakteryzuje się także innym sposobem użytkowania, ponieważ przede wszystkim, ma za zadanie wspierać codzienne czynności lub służyć odpoczynkowi [193]. Jednakże, także w budynkach mieszkalnych oświetlenie ma znaczący, 14% udział w zużywanej przez nie energii elektrycznej [174]. W krajach Unii Europejskiej jest to przeciętnie od 10% [192, 194] do 11% [112], w Szwajcarii do 12% [111], w Wielkiej Brytanii 17% [24], w USA od 12% [112] do 21% [176], podczas gdy w Egipcie nawet 20–35% [144].

Podsumowując przedstawione dane, na cele oświetleniowe zużywane jest 7–20% światowej produkcji energii oraz 19–30% produkcji energii elektrycznej. Wynika stąd, że oświetlenie elektryczne odpowiada na znaczącą część globalnego zużycia energii. W różnych regionach świata oświetlenie budynków odpowiada za 20–40% w zużywanej przez nie energii oraz 19–50% biorąc pod uwagę zużycie samej energii elektrycznej. W budynkach komercyjnych te wartości wynoszą odpowiednio 10–38% oraz 17–45%, natomiast w budynkach biurowych 14–40% oraz nawet 20–60%. Dane te pokazują, że oświetlenie jest obszarem o znaczącym wpływie na efektywność energetyczną całego budynku, a biorąc pod uwagę skalę oddziaływania budynków na światowe zużycie energii, ma także znaczący wpływ na zużycie energii w skali globalnej. Jak wspomniano we wstępie, ze względu na organizację pracy i specyfikę wykonywanych zadań wzrokowych, szczególnie znaczący udział oświetlenia w profilu zapotrzebowania na energię elektryczną występuje w budynkach biurowych.

2.2. Możliwości poprawy efektywności energetycznej instalacji oświetleniowych

Zużycie energii elektrycznej przez instalację oświetleniową wynika z pracy źródeł światła, a także wszystkich urządzeń pomocniczych, których działanie jest

⁵ Zalecenia dotyczące oświetlenia budynków mieszkalnych zawarte były jedynie w wycofanej już normie PN-84/E-02033 „Oświetlenie wewnątrz światłem elektrycznym” [391].

niezbędne dla prawidłowego funkcjonowania oświetlenia, np. urządzeń zasilających, czujników i układów sterowania [195]. Całkowite zużycie energii przez instalację oświetleniową można wyrazić jako sumę energii [196]:

- do oświetlania, zużywanej przez źródła światła i inne elementy instalacji, w czasie kiedy lampy pracują,
- pasożytniczej, zużywanej przez urządzenia, w tym układy automatycznego sterowania kiedy lampy są wyłączone (w stanie czuwania - *standby*) i instalacja pozostaje w stanie gotowości do działania.

Wśród czynników decydujących o energochłonności oświetlenia można wymienić przede wszystkim [32, 86]:

- opracowywanie koncepcji i projektu oświetlenia danej przestrzeni, uwzględniających wymagania związane z charakterem i trudnością czynności wzrokowych oraz uwarunkowania środowiskowe,
- rodzaj i jakość źródeł światła, układów zasilania oraz opraw oświetleniowych,
- rodzaj systemu oświetlenia (oświetlenie ogólne, miejscowe, złożone) i klasa oświetleniowa (np. oświetlenie pośrednie, bezpośrednie, mieszane), rozmieszczenie opraw (równomierne, zlokalizowane), oświetlenie ścienne lub sufitowe, itp.,
- sposób organizacji instalacji elektrycznej zasilającej lampy, podział na oddzielnie sterowane obwody odbiorcze umożliwiające czasowe wyłączenia światła w określonych przestrzeniach, ograniczenie strat przez „twarde” wyłączenie zasilania,
- funkcje systemu automatycznego sterowania oświetleniem, dopasowanie metod sterowania do specyfiki danego pomieszczenia, integracja sterowania oświetleniem w ramach systemu sterowania i automatyzacji budynku,
- sposób eksploatacji instalacji oświetleniowej, w tym przyjęta metoda konserwacji urządzeń oświetleniowych.

Charakterystyka nowoczesnych źródeł światła LED

W oświetleniu wewnątrz stosowane są różne rodzaje źródeł światła. Przegląd ich podstawowych parametrów przedstawiono w tabeli 1.

Spośród istniejących źródeł światła, w ostatnich latach szczególnym zainteresowaniem cieszą się półprzewodnikowe źródła typu LED (*light emitting diode*). Źródła te stanowią przełomową technologię oświetlenia i należą one do kolejnej, IV generacji źródeł światła, tzw. świecących ciał stałych (*SSL – solid-state lighting*), emitujących światło w wyniku zjawiska elektroluminescencji [5, 197, 147, 198, 199, 161]. Pierwsze diody elektroluminescencyjne wyprodukowano w 1962 r., początkowo były to jednak źródła monochromatyczne o niskiej mocy, które znalazły zastosowanie jako oświetlenie sygnalizacyjne. Wynalezienie diod emitujących światło białe w latach

Tabela 1. Przegląd podstawowych parametrów źródeł światła [27, 25, 31, 200, 201, 202, 203].

| parametr | żarowe źródła światła | | wysokoprężne lampy wyładowcze | | niskoprężne lampy wyładowcze rtęciowe | | lampa LED |
|--|---|------------------------------------|--|---|--|---|--|
| | żarówka | żarówka halogenowa | lampa sodowa | lampa metalohalogenkowa | światłówka liniowa | światłówka kompaktowa | |
| moc znamionowa [W] | 3 – 1000 | 5 – 2000 | 35 – 1000 | 30 – 3500 | 4 – 200 | 3 – 120 | 2 – 20 |
| skuteczność świetlna [lm/W] | 6 – 18 | 11 – 33 | 64 – 150 | 60 – 115 | 25 – 120 | 50 – 87 | 60 – 200 |
| ogólny wskaźnik oddawania barw R_a^6 | 100 | 100 | 25 – 80 | 75 – 100 | 50 – 98 | 78 – 96 | 60 – 98 |
| temperatura barwowa najbliższa T_c [K] | 2700 – 3000 | 2700 – 3400 | 2050 – 4000 | 3200 – 6800 | 2700 – 8000 | 2500 – 6500 | 2200 – 10000 |
| trwałość [h] | 750 – 1200 | 1700 – 3000 | 12000 – 15000 | 6000 – 24000 | 7000 – 20000 | 8000 – 10000 | 35000 – 50000 |
| zjawisko fizyczne | emisja promieniowania widzialnego przez rozgrzany drut wolframowy | | wyładowanie elektryczne w oparach sodu | wyładowanie elektryczne w mieszaninie par rtęci oraz halogenków metali | wyładowanie elektryczne w oparach rtęci, emitowane promieniowanie nadfioletowe pobudza luminofor do świecenia światłem widzialnym | | elektroluminescencja w złączu półprzewodnikowym |
| obszary zastosowań w budynkach | oświetlenie miejscowe | oświetlenie punktowe i projekcyjne | ze względu na niski wskaźnik oddawania barw stosowane jedynie do oświetlania hal przemysłowych | iluminacja budynków oraz oświetlenie wystaw i ekspozycji; niestosowane w oświetleniu wnętrz biurowych i mieszkalnych ze względu na konieczność stosowania balastu z zapłonikiem i długi czas stygnięcia niezbędny do ponownego załączenia | oświetlenie pomieszczeń biurowych, mieszkalnych, komunikacyjnych itp.; powszechnie stosowane w budownictwie biurowym i użyteczności publicznej | oświetlenie pomieszczeń biurowych, mieszkalnych, komunikacyjnych itp.; powszechnie stosowane w budownictwie mieszkaniowym | wraz z rozwojem technologii są coraz bardziej rozpowszechnione we wszystkich typowych obszarach zastosowań |

⁶ Ogólny wskaźnik oddawania barw R_a (CRI – *color rendering index*), zgodnie z metodą CIE 13.3-1995 [390], charakteryzuje zdolność źródła światła do odtworzenia barw 14 próbek testowych, w odniesieniu do wzorcowego źródła światła.

90. XX wieku otworzyło drogę do ich zastosowania w oświetleniu przestrzeni [198]. W 2010 r. udział lamp LED w światowym rynku oświetleniowym wynosił zaledwie 0,3%, podczas gdy w 2016 r. osiągnął 26% i wciąż rośnie [199]. Dzięki swoim korzystnym cechom, lampy LED są coraz bardziej rozpowszechnione w instalacjach oświetleniowych, zajmując miejsce żarowych lub wyładowczych źródeł światła. Trafiają one zarówno do obiektów nowo wznoszonych jak i do istniejących budynków w trakcie prac modernizacyjnych. W porównaniu do świetlówek kompaktowych, lampy LED używane w ogólnym oświetleniu biur, podczas całego cyklu życia – głównie dzięki wysokiej efektywności energetycznej – wywierają mniejszy wpływ na środowisko naturalne (41–50% redukcja emisji gazów cieplarnianych i skumulowanego zapotrzebowania na energię [204]). Dążenie do minimalizacji zużycia energii w budownictwie oraz troska o środowisko naturalne będą prowadziły do coraz szerszego ich stosowania [5, 197]. Wśród zalet lamp LED można wymienić [27, 202, 205, 206, 198, 207, 32]:

- wysoką skuteczność świetlną, także podczas ściemniania,
- bardzo wysoką trwałość (źródło LED uznaje się za sprawne kiedy emituje strumień świetlny na poziomie co najmniej 70% strumienia początkowego [147], tak rozumiana trwałość samych diod LED jest zazwyczaj znacznie wyższa niż układu zasilającego),
- małe gabaryty i masę,
- brak zawartości toksycznych substancji np. rtęci,
- brak emisji promieniowania nadfioletowego (UV) i podczerwonego (IR) – nieprzydatnego w kontekście funkcji oświetlania,
- odporność mechaniczną (np. na wstrząsy, wibracje i uderzenia),
- szeroki zakres temperatur pracy,
- krótki czas reakcji – niemal natychmiastowy rozruch i wyłączenie, możliwość częstego załączania i wyłączenia,
- bardzo dobre własności regulacyjne strumienia świetlnego, możliwość kontroli widma promieniowania (temperatury barwowej lub barwy światła).

Wady lamp LED to przede wszystkim [27, 202, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218]:

- spadek emisji strumienia świetlnego wraz z upływem czasu i postępującym starzeniem źródła (nawet o 45%),
- niski współczynnik oddawania barw,
- nagrzewanie się złącza półprzewodnikowego – nieskuteczne odprowadzanie ciepła prowadzi do obniżenia emisji strumienia świetlnego oraz skuteczności świetlnej, a także skrócenia trwałości diod LED,
- układy zasilające wyposażone w energoelektroniczne przekształtniki impulsowe (SMPS – *switched-mode power supply*) wprowadzają do sieci zasilającej wyższe harmoniczne prądu, charakteryzują się niskim współczynnikiem mocy, a także

pobierają z sieci moc bierną pojemnościową – przy czym odkształcenie prądu zależy od użytego zasilacza,

- w trakcie ściemniania lamp LED, współczynnik mocy ulega obniżeniu bardziej niż w przypadku innych typów lamp [206, 219],
- migotanie światła w przypadku niskiej jakości układu zasilającego.

Szybka ekspansja źródeł światła LED, leżąca w interesie ich producentów, spowodowała, że przepisy i normy „nie nadążają” z rynkiem. W konsekwencji w sprzedaży dostępne są często produkty niskiej jakości, a także nie spełniające deklarowanych przez producentów parametrów. Powszechnie stosowany wskaźnik oddawania barw R_a nie charakteryzuje w pełni jakości oddawania barw przez źródła LED, przez co brak jest narzędzia porównawczego [5]. Problematyka parametrów jakościowych oświetlenia LED w szczególności w zakresie wierności oddawania barw jest obecnie przedmiotem dyskusji naukowej na świecie. Istotnym, a często zaniedbywanym problemem jest również zjawisko migotania światła wytwarzanego przez lampy LED wyposażone w niskiej jakości układy zasilające [197, 208].

Kompletne oprawy oświetleniowe LED stosowane w instalacjach oświetleniowych są zbudowane z [208]:

- modułu LED (źródła światła), emitującego strumień świetlny, składającego się z pojedynczej diody bądź matrycy połączonych szeregowo lub szeregowo-równolegle diod LED,
- układu zasilającego (*LED driver*), przekształcającego napięcie przemienne sieci zasilającej na napięcie stałe oraz stabilizującego prąd diod LED dla zapewnienia stałego punktu pracy; układ ten może także realizować funkcję ściemniania,
- układu optycznego formującego wiązkę światła i ograniczającego olśnienie, mającego także wpływ na oddawanie barw,
- obudowy, fizycznie zespalającej elementy składowe oprawy, stanowiącej osłonę od czynników zewnętrznych, oraz decydującej o termicznych warunkach pracy diod LED.

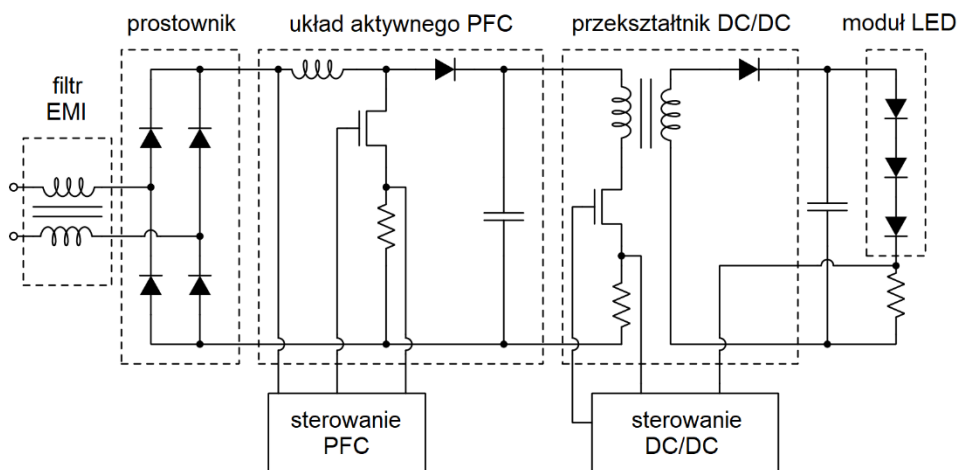
Istnieje wiele różnych topologii układów zasilających źródeł LED. Na rysunku 3 pokazano przykładowy, dwustopniowy układ, zawierający następujące elementy [208, 220]:

- filtr zakłóceń elektromagnetycznych (EMI - *electromagnetic interference*) – na wejściu układu znajduje się filtr bierny redukujący emisję zakłóceń o wysokiej częstotliwości do sieci; w niskiej jakości układach filtr ten nie występuje,
- prostownik diodowy – przetwarza napięcie przemienne na napięcie wyprostowane,
- obwód aktywnej korekcji współczynnika mocy (PFC - *Power Factor Correction*) – jest on realizowany jako przekształtnik DC/DC podwyższający napięcie (*boost*) sterowany w taki sposób, aby kształt prądu sieci był zbliżony do sinusoidalnego i współfazowy z napięciem sieci (obwód ten stosowany jest zazwyczaj jedynie w lampach LED o mocy przekraczającej 25 W, objętych restrykcyjnymi limitami

emisji zakłóceń lub wysokiej jakości układach; na rynku występują także układy jednostopniowe, w których obwód PFC jest połączony z przekształtnikiem DC/DC),

- przekształtnik DC/DC zaporowy (*flyback*), sterowany w celu stabilizacji prądu diody LED dla zapewnienia stałego punktu pracy.

Topologia oraz jakość zastosowanego układu zasilającego decydują o żywotności diod LED, stabilności emisji strumienia świetlnego w czasie (migotanie światła) jak i poziomie zaburzeń emitowanych do sieci elektroenergetycznej.



Rysunek 3. Schemat dwustopniowego układu zasilającego źródło światła LED [208].

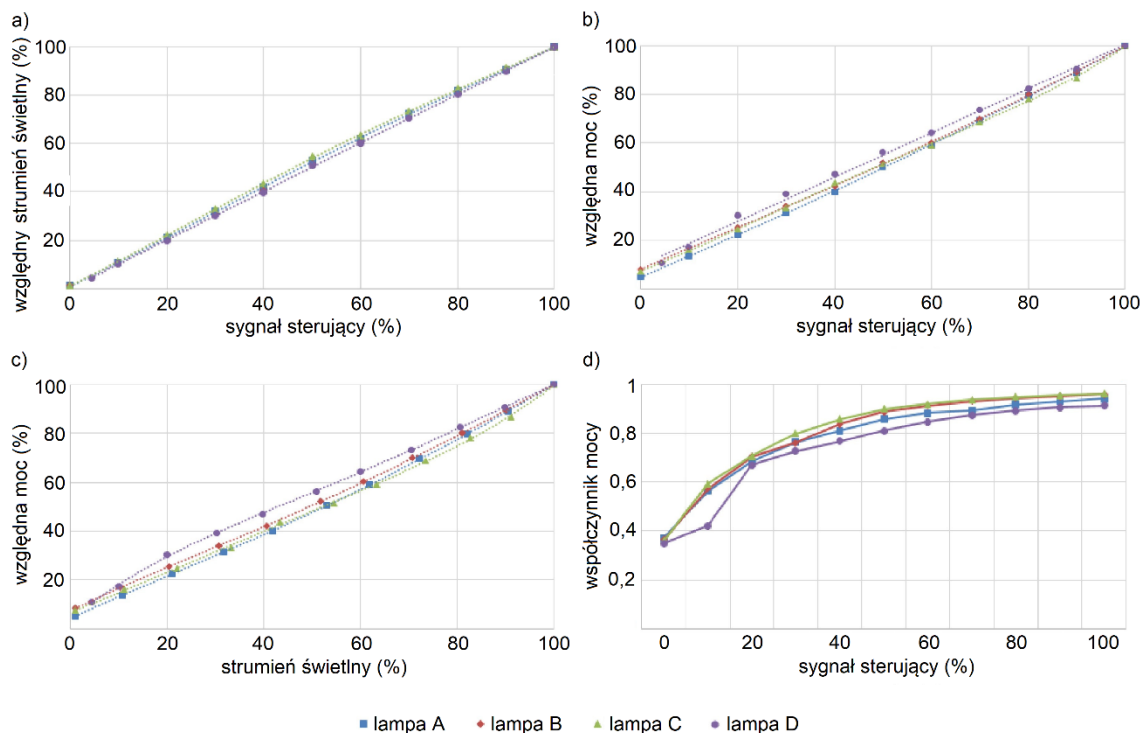
Zastosowanie lamp LED w energooszczędnych systemach sterowania oświetleniem

Zasadniczo w celu obniżenia zużycia energii na potrzeby oświetleniowe, w zależności od potrzeb warunków i możliwości stosuje się sterowanie (ręczne lub automatyczne) mające na celu [82, 32]:

- regulację czasu użytkowania oświetlenia poprzez włączanie i wyłączenie (gdy oświetlenie nie musi być włączone przez cały czas),
- regulację mocy lampy poprzez rozjaśnianie i ściemnianie (gdy nie cała moc zainstalowana oświetlenia musi być wykorzystywana podczas pracy lamp).

Regulacja strumienia świetlnego źródeł LED może być realizowane poprzez obniżenie prądu diody lub modulację szerokości impulsów PWM (*Pulse-Width Modulation*) [221].

Na rysunku 4 przedstawiono charakterystyki ściemniania różnych lamp LED. W porównaniu do innych typów źródeł światła, lampy te mają bardzo korzystne charakterystyki regulacji strumienia świetlnego – jest on niemal liniowo zależny od sygnału sterującego [222, 219, 128]. Szczególną zaletą lamp LED jest w przybliżeniu wprost proporcjonalne obniżanie mocy wraz z ich ściemnianiem [222, 184, 223, 224, 172, 169] – lampy LED zachowują prawie stałą skuteczność świetlną podczas ściemniania [151, 206]. Jak można zaobserwować w prezentowanym przykładzie wraz z obniżaniem strumienia świetlnego obniżeniu ulega także współczynnik mocy.



Rysunek 4. Przykładowe charakterystyki ściemniania lamp LED czterech różnych producentów: a) względny wytwarzany strumień świetlny w funkcji sygnału sterującego, b) względna moc w funkcji sygnału sterującego, c) względna moc w funkcji względnego wytwarzanego strumienia świetlnego, d) współczynnik mocy w funkcji sygnału sterującego [219].

Automatyczne wyłączenie nieużywanego oświetlenia prowadzi do pracy lamp w częstych cyklach załączania i wyłączenia. W tym przypadku, korzystną cechą źródeł LED jest niska bezwładność, umożliwiająca niemal natychmiastowe osiągnięcie pełnej jasności oraz możliwość szybkiego wznowienia pracy po uprzednim wyłączeniu. W ogólnym bilansie korzyści wynikających z automatycznego sterowania, należy także zwrócić uwagę na odporność lamp na pracę w warunkach obniżonego strumienia świetlnego oraz częstych cykli załączania i wyłączenia, gdyż pojawiające się usterki mogą zniweczyć osiągnięte oszczędności energii elektrycznej [146, 147]. Niezawodność oraz niezmienność emisji strumienia świetlnego diod elektroluminescencyjnych są determinowane warunkami termicznymi złącza półprzewodnikowego, przy czym wyższe temperatury powodują przyspieszone starzenie źródła [221, 212, 32]. Dlatego sterowanie z wykorzystaniem ściemniania nie ma negatywnego wpływu na żywotność źródeł światła LED, a wręcz może ją wydłużyć, ze względu na obniżenie temperatury złącza [221, 48]. Częste cykle załączania i wyłączenia nie obniżają trwałości samych diod elektroluminescencyjnych, przyczynami usterki może być natomiast niska jakość układu zasilającego, bądź zużycie łączników elektrycznych obwodów oświetleniowych [147, 201, 202].

Podsumowując, cechy lamp LED są bardzo korzystne z punktu widzenia ich zastosowania w energooszczędnych systemach automatycznego sterowania oświetleniem.

2.3. Budynek typu *smart*, a efektywność energetyczna

Standardy automatyki budynkowej

Na rynku istnieją różne rodzaje systemów automatycznego sterowania wykorzystywanych w budownictwie typu *smart*. Najogólniej można je sklasyfikować jako systemy [31, 88, 56]:

- zamknięte (firmowe) – charakteryzują się niejawnym protokołem komunikacji oraz zamkniętym oprogramowaniem, dzięki czemu cechuje je wysoki poziom bezpieczeństwa; systemy te są zazwyczaj opracowywane i sprzedawane przez jednego producenta, przez co są kosztowne (instalacja i serwisowanie systemu możliwe tylko przez jego producenta); ograniczone możliwości rozbudowy (utrudniona i kosztowna integracja z systemami innych firm);
- otwarte (publiczne) – charakteryzują się jawnym protokołem komunikacji oraz dostępnością oprogramowania, dzięki czemu urządzenia różnych producentów są w pełni kompatybilne ze sobą i mogą się wzajemnie komunikować; zaletami takiego rozwiązania jest elastyczność – możliwość łatwej rozbudowy lub modyfikacji sieci (szeroki wachlarz dostępnych urządzeń różnych producentów), a także możliwość wdrożenia i obsługi systemu przez niezależnego wykonawcę.

Wśród systemów otwartych, obecnie najbardziej rozpowszechnione są systemy takie jak: LonWorks (LON – *Local Operating Network*), KNX (dawniej EIB – *European Installation Bus*), Modbus oraz BACnet (*building automation and control networking protocol*), a przyjęcie konkretnego rozwiązania uzależnione jest od specyfiki projektowanej instalacji [107, 225, 91, 136, 226].

Jednym z najpopularniejszych standardów stosowanych w systemach sterowania i automatyzacji budynków na całym świecie jest system LonWorks (międzynarodowa norma ISO/IEC 14908). LonWorks jest otwartym, rozproszonym systemem automatyki budynkowej, który został opracowany i wprowadzony na rynek w latach 90. XX wieku przez firmę Echelon Corporation powstałą z inicjatywy firm Toshiba i Motorola. Głównym celem twórców była standaryzacja komunikacji pomiędzy różnymi elementami złożonego systemu sterowania [226, 31].

W sterowaniu oświetleniem wykorzystywany jest system DALI (*Digital Addressable Lighting Interface*), który jest prostym, cyfrowym protokołem komunikacyjnym przyjętym przez międzynarodowe środowisko producentów urządzeń oświetleniowych. System, którego powstanie zainicjowały firmy takie jak Philips, Helvar, Osram i Tridonic zaprezentowano w 2000 roku na międzynarodowych targach we Frankfurcie jako alternatywę dla systemu analogowego. DALI w przeciwieństwie do systemu analogowego 1-10V DC, dzięki indywidualnemu adresowaniu umożliwia niezależne sterowanie każdej oprawy oświetleniowej, a dzięki temu realizację zaawansowanych metod sterowania oświetleniem. Sterowniki posiadają zaimplementowane funkcje, takie jak: sterowanie od światła dziennego czy zajętości

pomieszczenia, obsługa osłon zaciemniających, monitorowanie czasu pracy lub uszkodzeń lamp bądź szacowanie zużycia energii. Zaletami systemu DALI są między innymi [121, 31, 227]:

- możliwość zmian konfiguracji systemu bez ingerencji w instalację elektryczną,
- prostota instalacji – dzięki wykorzystaniu magistrali komunikacyjnej kolejne urządzenia są przyłączane równolegle (przy sterowaniu analogowym od sterownika należało doprowadzić oddzielne przewody do każdej oprawy oświetleniowej),
- odporność na zakłócenia – stabilność emisji strumienia świetlnego,
- ściemnianie i rozjaśnienie zgodnie z logarytmiczną charakterystyką postrzegania zmian oświetlenia przez oko ludzkie,
- otwartość systemu – protokół DALI został ujednoczony na szczeblu międzynarodowym poprzez normę IEC 62386 (istnieje możliwość dowolnej rozbudowy systemu z wykorzystaniem komponentów pochodzących od różnych producentów).

Ograniczenia systemu DALI to przede wszystkim [31, 227]:

- ze względu na maksymalny dopuszczalny spadek napięcia rzędu 2 V, odległość między najodleglejszym urządzeniem sterowanym, a sterującym jest ograniczona do 300 m dla żyły o przekroju 1,5 mm²,
- w obrębie pojedynczej magistrali DALI można połączyć co najwyżej 64 urządzenia oświetleniowe oraz utworzyć do 16 grup oraz do 16 scen świetlnych.

Urządzenia systemów automatyki budynkowej mogą komunikować się w sposób przewodowy, wykorzystując np. parę przewodów skręconych (TP – *twisted pair*), przewód koncentryczny, przewody tradycyjnej instalacji elektrycznej (PL – *power line*) czy światłowody. Coraz częściej stosuje się także metody komunikacji bezprzewodowej, budzące jeszcze niedawno obawy projektantów i integratorów. W tym zakresie wykorzystuje się fale radiowe (RF – *radio frequency*), promieniowanie podczerwone lub łącza transmisji ultradźwiękowej [56].

Na poziomie wykonawczym systemy komunikują się wykorzystując własne, często różne protokoły (np. M-Bus, ModBus, BACnet, DALI, LonWorks, KNX, protokoły firmowe). Na poziomie automatyzacji następuje integracja systemowa i sprzętowa, co umożliwia wzajemną komunikację urządzeń. Skupiają się tutaj wszystkie magistrale sieciowe, a także tworzona jest lokalna sieć korzystająca z wspólnego protokołu komunikacji. Sieć ta umożliwia wymianę informacji między sterownikami poziomu automatyzacji, a także służy wymianie informacji z poziomem zarządzania [107, 228, 225, 90, 123, 229, 230, 231].

Zintegrowany system sterowania i automatyzacji budynku

Zintegrowany system sterowania i automatyzacji (automatyki budynkowej) charakteryzuje się zdolnością komunikacji i współdziałania z urządzeniami i systemami automatyzacji budynku (także pochodzących od różnych dostawców), oferując wielofunkcyjną współzależność pomiędzy usługami, funkcjami i podsystemami budynku [33]. System ten stanowi instalację elektryczną nowej generacji, która umożliwi wzajemną komunikację wszystkich odbiorników energii elektrycznej w budynku. Obecnie, to właśnie zintegrowane zarządzanie odróżnia budynki, które można określić mianem *smart*, od innych, „zwykłych” budynków wyposażonych w niezależne systemy automatycznego sterowania. Zatem „inteligencja” budynku wynika przede wszystkim z możliwości efektywnego współwykorzystywania dostępnych zasobów technicznych, a nie samej obecności nawet bardzo zaawansowanych, lecz działających niezależnie systemów sterowania, instalacji technicznych i urządzeń [56]. Z kolei stopień „inteligencji” budynku wynika z rodzaju zastosowanych systemów automatycznego sterowania oraz ich wzajemnych powiązań, a także oprogramowania sterującego i zaimplementowanych algorytmów [99].

Zintegrowany system sterowania i automatyzacji budynku pod względem funkcjonalnym charakteryzuje się strukturą hierarchiczną (patrz rysunek 5) [226, 56]. System ten pozyskuje informacje o stanie budynku za pomocą czujników (sensorów) przekształcających bodźce fizyczne w sygnał, który można zmierzyć. Przykładami sensorów są między innymi czujniki temperatury, wilgotności, światła, ruchu lub stężenia CO₂. System odbiera także informacje od użytkowników które są przekazywane z pomocą różnego rodzaju urządzeń komunikacji człowiek-maszyna (HMI – *human-machine interface*). Użytkownik może komunikować się z systemem oraz zadawać nastawy przykładowo za pomocą zadajników ściennych, paneli dotykowych, pilotów zdalnego sterowania, telefonu komórkowego czy komputera. Przy wykorzystaniu sieci telefonii komórkowej lub sieci Internet może się to odbywać także spoza budynku. Następnie, na podstawie zebranych informacji system – poprzez sformułowanie poleceń – reaguje na zmieniające się warunki środowiskowe zewnętrzne (takie jak temperatura, nasłonecznienie lub prędkość wiatru) oraz wewnętrzne (np. obecność użytkowników, intensywność użytkowania pomieszczeń). Za wykonanie poleceń odpowiedzialne są elementy wykonawcze (tzw. aktory), których przykładami są siłowniki zaworów, pompy, napędy rolet lub styczniki załączające poszczególne obwody [232, 233, 226, 125, 56]. Sterowanie procesami w budynku może odbywać się całkowicie automatycznie, przy współudziale użytkownika (np. zadawanie nastaw) lub ręcznie. Działania samoczynne są realizowane jako [122, 234]:

- sterowanie czasowe (praca systemów według ustalonych harmonogramów czasowych),
- sterowanie parametryczne (praca systemów w zależności od różnych zmiennych: np. temperatury w pomieszczeniu, stanu otwarcia okna lub obecności użytkownika w pomieszczeniu).

poziom zarządzania – nadrzędny, nadzoruje pracę wszystkich podsystemów odpowiedzialnych za realizację funkcji sterowania oraz zarządza procesami zachodzącymi w budynku; obejmuje serwery z bazami danych i stacje operatorskie (najczęściej komputery typu PC ze specjalistycznym oprogramowaniem), które pełnią funkcje zarządzania, akwizycji i archiwizacji danych, wizualizacji i monitoringu; stacja operatorska umożliwia obsłudze kompleksowe zarządzanie budynkiem, obsługę harmonogramów i alarmów, sterowanie elementami systemu oraz programowanie urządzeń poziomów automatyzacji i wykonawczego, dostęp do danych bieżących i historycznych, a także generowanie raportów ułatwiających podejmowanie decyzji dotyczących eksploatacji budynku

poziom automatyzacji (sterowania i automatyki budynkowej) – obejmuje autonomiczne sterowniki sieciowe (wyposażone w mikroprocesory i pamięć) rozmieszczone w przestrzeni budynku, które obsługują poszczególne podsystemy techniczne i bezpieczeństwa w różnych strefach obiektu oraz przygotowują dane dla poziomu nadrzędnego; sterowniki funkcjonują nawet w przypadku braku komunikacji z urządzeniami poziomu nadrzędnego, co zapewnia wysoką niezawodność całego systemu

poziom wykonawczy (obiektowy, pola) – składa się z regulatorów, prostych sterowników wykonujących bezpośrednie funkcje sterowania, wyspecjalizowanych sterowników niektórych odbiorów (np. autonomicznych systemów bezpieczeństwa, central wentylacyjnych, pomp ciepła), a także czujników i elementów wykonawczych

Rysunek 5. Struktura hierarchiczna zintegrowanego systemu sterowania i automatyzacji budynku.

Funkcjonalność zintegrowanego systemu sterowania i automatyzacji budynku

Ze względu na pełnione funkcje, poszczególne systemy i instalacje techniczne budynku typu *smart* (podsystemy funkcjonalne) można przyporządkować do kilku obszarów funkcjonalnych (patrz tabela 2). Wszystkie podsystemy działają w ramach zintegrowanego systemu sterowania, dzięki czemu komunikują się ze sobą i współdziałają [122, 93, 89, 96, 235, 90]. Należy podkreślić, że ze względu na postępującą integrację, granice między poszczególnymi podsystemami zacierają się i często są trudne do określenia [56]. Dlatego też, oświetlenie w budynku typu *smart* można sklasyfikować w obszarze systemów zarządzających warunkami mikroklimatycznymi, a także systemów zarządzania energią [103, 56, 236].

Tabela 2. Obszary funkcjonalne systemów i instalacji technicznych budynku typu smart oraz podsystemy działające w ramach tych obszarów odpowiedzialne za realizację poszczególnych funkcji [56].

| obszar funkcjonalny systemów i instalacji technicznych budynku typu <i>smart</i> | podsystemy funkcjonalne |
|--|--|
| systemy bezpieczeństwa | <ul style="list-style-type: none"> • kontrola dostępu • kontrola wjazdu • sygnalizacja włamania i napadu • sygnalizacja zagrożenia pożarem • nagłośnienie ewakuacyjne • oświetlenie awaryjne • oddymianie • automatyczne gaszenie • sterowanie systemami w stanach alarmowych • telewizja dozorowa, monitoring wizyjny i dźwiękowy • kontrola składu powietrza • ochrona przed zalaniem • symulacja obecności • sterowanie zamknięciem rolet |
| systemy zarządzające warunkami mikroklimatycznymi | <ul style="list-style-type: none"> • oświetlenie • ogrzewanie / chłodzenie • nawilżanie / osuszanie • wentylacja / kontrola jakości powietrza |
| systemy zarządzania energią | <ul style="list-style-type: none"> • monitoring zużycia energii i mediów • zarządzanie i optymalizacja zużycia energii i mediów • zarządzanie poborem mocy i energii elektrycznej • zarządzanie produkcją i magazynowaniem energii pozyskiwanej z źródeł alternatywnych • zasilanie gwarantowane |
| systemy dostarczające usługi teleinformatyczne | <ul style="list-style-type: none"> • okablowanie strukturalne • lokalne sieci komputerowe oraz połączenia z sieciami zewnętrznymi • bezpieczeństwo informatyczne • systemy transmisji danych, obrazu i dźwięku • systemy automatyzacji miejsc pracy |

Zintegrowany system sterowania i automatyzacji, a efektywność energetyczna budynku

Bez wsparcia systemów automatycznego sterowania, nawet najlepsza obudowa i wysokosprawne instalacje HVAC, przy zmiennych warunkach zewnętrznych nie zapewnią wysokiej wydajności energetycznej budynku i zoptymalizowanych warunków

mikroklimatu wewnętrznego [237]. Systemy sterowania i automatyzacji budynku⁷ (BACS – *building automation and control system*) zapewniają skuteczne funkcje sterowania instalacjami technicznymi budynku, umożliwiające poprawę jego sprawności energetycznej [33]. Uogólniając, ze względu na skalę oddziaływania na wydajność energetyczną budynków, poszczególne instalacje mogą być sterowane [33, 238]:

- ręcznie, bez sterowania automatycznego,
- automatycznie, z wykorzystaniem sterowania centralnego,
- automatycznie, z wykorzystaniem indywidualnego, autonomicznego sterowania na poziomie pomieszczeń,
- automatycznie, z wykorzystaniem indywidualnego sterowania pomieszczeniem według bieżącego zapotrzebowania na poszczególne formy energii (realizowane w ramach zintegrowanego systemu BACS).

Najwyższa efektywność energetyczna budynku może być osiągnięta przy wykorzystaniu zintegrowanego systemu BACS, który umożliwia dostarczanie energii w odpowiedniej ilości, dokładnie w czasie i miejscu gdzie występuje na nią zapotrzebowanie. Ponadto, dzięki funkcjom technicznego zarządzania budynkiem (TBM – *technical building management*) system taki dostarcza użytkownikowi informacje o bieżącym, historycznym oraz prognozowanym zużyciu energii i mediów w przystępnej postaci, dzięki czemu kształtuje jego świadomość w zakresie gospodarowania nośnikami energii, ułatwia podejmowanie decyzji dotyczących eksploatacji budynku oraz sprzyja racjonalnemu użytkowaniu urządzeń [56, 31].

W celu dystrybucji strumieni energii do poszczególnych stref budynku według zapotrzebowania, niezbędna jest odpowiednia funkcjonalność systemu BACS, a także konstrukcja instalacji technicznych, adekwatna do zakładanego stopnia wpływu systemu BACS na efektywność energetyczną budynku. Dlatego proces projektowania budynku typu *smart*, powinien przebiegać w sposób zintegrowany. Dotychczasową praktyką było uzupełnianie już istniejących projektów instalacji technicznych o projekt automatyki budynkowej. Obecnie, podczas tworzenia systemu BACS konieczna jest ścisła współpraca projektantów automatyki z projektantami pozostałych branż już od początku procesu projektowania i wspólne wypracowanie założeń funkcjonalnych zintegrowanego systemu sterowania, obejmujących zarówno funkcje samej instalacji typu *smart* jak i instalacji i urządzeń technicznych w budynku [56].

⁷ Termin system sterowania i automatyzacji budynku (BACS) jest zalecany przez normę PN-EN 15232 [293]. W literaturze system sterowania i automatyzacji budynku określa się jednak także jako system zarządzania budynkiem (BMS – *building management system*), system zarządzania i sterowania budynkiem (BMCS – *building management and control system*), system autoamtyzacji budynku (BAS – *building automation system*) lub system sterowania budynkiem (BCS – *building control system*). W odniesieniu do funkcji związanych z zarządzaniem energią używa się także określeń takich jak system zarządzania energią (EMS – *energy management system*) lub system sterowania i zarządzania energią (EMCS – *energy management and control system*). Podobnie jak sama definicja budynku inteligentnego, tak i w tym obszarze terminologia i systematyka nie zostały do tej pory ujednoczone – zagadnienie to zostało bardziej szczegółowo poruszone w publikacji [56].

Szczegółową listę funkcji systemów BACS oraz TBM mających wpływ na osiągi energetyczne budynku określono w normie PN-EN 15232 [33]. Funkcje te sklasyfikowano według wpływu na poprawę efektywności energetycznej poszczególnych instalacji budynku. Funkcje systemów BACS w zakresie oświetlenia przedstawiono szczegółowo w rozdziale 2.7.

Systemy sterowania i automatyzacji budynku, w stosunku do tradycyjnej instalacji elektrycznej, podnoszą nakłady inwestycyjne w fazie budowy, przez co są niechętnie stosowane przez deweloperów [92, 125, 107]. Jednakże, podczas eksploatacji budynku systemy te, w skali całego budynku zapewniają od 10–25% [125] do 40% [239, 240] oszczędności energii. Dzięki temu obniżeniu ulegają koszty eksploatacyjne, które stanowią aż około 70% kosztu całego cyklu życia obiektu (z uwzględnieniem kosztów budowy) [239, 234]. Okres zwrotu systemu szacuje się na średnio na 0,7–5,4 lat [241]. Ciągły rozwój technologii powoduje, że uzyskiwane oszczędności energii są coraz wyższe, a okres zwrotu inwestycji ulega skróceniu [241, 240].

2.4. Akceptacja systemów automatycznego sterowania przez ludzi

U użytkowników wielu biurowców obserwuje się uczucie dyskomfortu oraz niekorzystne objawy związane z przebywaniem w budynku lub określonych jego pomieszczeniach. Wśród objawów występują [93, 123, 88, 242]:

- pogorszenie samopoczucia,
- zmęczenie,
- uczucie duszności,
- bóle i zawroty głowy,
- drażliwość,
- trudności w koncentracji uwagi,
- zaburzenia pamięci,
- podrażnienie oczu i górnych dróg oddechowych.

Sytuację w której u użytkowników budynku występują te niekorzystne objawy nazwano „syndromem chorego budynku” (SBS – *sick building syndrome*) [93, 123, 88, 242]. Przyczyną negatywnego oddziaływania na ludzi są nieprawidłowe warunki mikroklimatyczne wnętrza, powstające na skutek nieprawidłowego funkcjonowania budynku i jego instalacji technicznych, a nawet błędów projektowych. Jako czynniki szkodliwe wymienia się między innymi [243, 208, 244, 197, 245, 246, 244, 81]:

- nieprawidłową wentylację lub klimatyzację,
- zanieczyszczenia chemiczne, pyłowe i biologiczne,
- hałas i drgania,

- promieniowanie optyczne, nieprawidłowe warunki oświetleniowe (w szczególności migotanie światła),
- pola elektromagnetyczne oraz elektryczność statyczna.

W odniesieniu do negatywnego oddziaływania oświetlenia na ludzi zaproponowano nawet analogiczne określenie „syndromu chorego oświetlenia” (*ill-lighting syndrome*) [81].

Na etapie eksploatacji budynków biurowych, zachowanie użytkowników może decydować nawet o ponad 40% zużycia energii [68], a zatem ma kluczowe znaczenie dla rzeczywistej efektywności energetycznej całego budynku. Aby zredukować wpływ działań użytkowników na energetyczne osiągi budynków, poddaje się automatyzacji systemy, które ludzie tradycyjnie sterowali w sposób ręczny dostosowując warunki mikroklimatyczne we wnętrzu (np. otwieralne okna, osłony przeciwsłoneczne, ogrzewanie, oświetlenie) [247].

Budynek typu *smart* powinien być przyjazny użytkownikowi, tworząc komfortowe środowisko wewnętrzne. Funkcje, które zapewnia, umożliwiają przeciwdziałanie czynnikom szkodliwym prowadzącym do powstania „syndromu chorego budynku” (np. kontrola jakości powietrza, efektywności wentylacji, wspomaganie obsługi i konserwacji systemów). Jednak, mimo postępu jaki dokonał się w systemach sterowania typu *smart*, wciąż znaczna część osób czuje się niekomfortowo w warunkach, które są automatycznie wytwarzane w pomieszczeniach [137, 71, 247, 71]. Bywa, że dyskomfort i irytację wywołuje sama obecność i działania podejmowane przez system automatycznego sterowania [80, 248]. Uważa się, że czynnikami prowadzącymi do braku akceptacji systemów automatycznego sterowania są przede wszystkim [248, 88, 86, 80, 71, 247, 105]:

- niekomfortowe warunki mikroklimatyczne wytwarzane przez system,
- pozbawienie użytkowników możliwości wpływu na otaczające środowisko (utrata poczucia kontroli, sprawczości),
- niezrozumienie intencji poszczególnych działań systemu,
- wrażenie nieodpowiedniego „*timing*u” (reakcje systemu są postrzegane jako zachodzące w niewłaściwym momencie),
- zbyt rozbudowany i szczelny system kontroli dostępu i monitoringu,
- nieprawidłowe działanie systemu automatycznego sterowania.

Przyczyną występowania wielu z tych czynników, jest zbytne przywiązywanie uwagi przez projektantów do jakości technicznej i osiągnięć energetycznych systemu automatyki budynkowej, a zaniedbywanie pozostałych czynników decydujących o jakości użytkowej i przyjazności systemu dla użytkownika [88, 80]. W konsekwencji, pomimo osiągniętego postępu, systemy automatycznego sterowania nie zostały powszechnie przyjęte przez użytkowników budynków [249].

Gdy automatyczne sterowanie prowadzi do pogorszenia komfortu ludzi, podejmują oni działania zmierzające do jego przywrócenia [48, 86, 71, 77, 250, 112, 251, 249]:

- wybierają nastawy minimalizujące konieczność wprowadzania korekt,
- sabotują działania systemu (np. zasłanianie lub dezaktywacja czujników),
- całkowicie wyłączają automatyczny systemy sterowania.

Konsekwencją tych działań użytkowników jest nieefektywne zarządzanie energią w budynku, co niweczy potencjalne (spodziewane, zakładane na etapie projektowania) oszczędności energii możliwe do uzyskania dzięki systemom automatycznego sterowania [248, 48, 112]. Skala tego zjawiska bywa znacząca – przykładowo, tryb automatycznego pozycjonowania żaluzji w 40 duńskich biurach był permanentnie wyłączany przez niemal 78% użytkowników [248]. Wobec tego akceptacja automatycznego sterowania przez użytkowników i satysfakcja z efektów jego działania, ma kluczowe znaczenie dla rzeczywistej efektywności energetycznej budynku wyposażonego w te systemy, a także dla właściwego prognozowania efektywności energetycznej na etapie projektowania budynku [252]. Ponadto, wzrost satysfakcji pracowników przekłada się bezpośrednio na efektywniejsze wykonywanie przez nich pracy [83], co ma duże znaczenie w obiektach biurowych.

Uważa się, że problematyka akceptacji systemów automatycznego sterowania, a także obszar interakcji człowieka z budynkiem są czynnikami, które będą miały znaczący wpływ na rozwój systemów automatyki budynków w przyszłości [108, 247, 58, 240].

Komunikacja człowieka z budynkiem

Prosty, przejrzysty i intuicyjny interfejs komunikacji człowiek-maszyna (HMI) jest niezbędny dla poprawy akceptacji systemów automatycznego sterowania przez użytkowników [80, 58]. Powinien on zapewniać mechanizmy komunikacji umożliwiające ludziom bezpośrednią interakcję z budynkiem i przekazywanie mu informacji zwrotnych, na które system sterowania powinien reagować [58].

Na rysunku 6 pokazano przykładowe, zorientowane na użytkownika interfejsy komunikacji, które mogą być zaimplementowane na panelu dotykowym, smartfonie czy komputerze PC. Interfejs po lewej stronie rysunku umożliwia odbieranie odczuć użytkowników na temat temperatury, wilgotności i oświetlenia w pomieszczeniu, które są następnie wykorzystywane w procesie sterowania. Za jego pośrednictwem użytkownik może także ręcznie, w sposób natychmiastowy zmienić nastawy urządzeń [253, 254, 255, 80]. Z kolei aplikacja pokazana po prawej stronie rysunku, umożliwia zadawanie warunków w pomieszczeniu za pomocą intuicyjnych suwaków [58].

Za pośrednictwem interfejsu komunikacji użytkownik może także otrzymywać informacje o wpływie własnych wyborów na zużycie energii, co będzie kształtowało jego świadomą postawę. Aby zapobiec niezrozumieniu intencji, użytkownik może być informowany o przyszłych i aktualnie podejmowanych działaniach systemu sterowania.



Rysunek 6. Przykładowe, zorientowane na użytkownika interfejsy komunikacji, które umożliwiają przesyłanie do systemu sterowania informacji o odczuciach i preferencjach dotyczących warunków mikroklimatycznych we wnętrzu [58, 80].

Dla ułatwienia komunikacji istotny jest łatwy dostęp do interfejsu (np. możliwość sterowania poprzez urządzenia zdalne lub za pomocą przeglądarki internetowej). Obserwuje się, że gdy dostęp do zadajników jest trudny (np. umiejscowienie urządzeń naściennych daleko od biurka) użytkownicy nie są skłonni do zmian nastaw oświetlenia [256, 77, 80]. Gdy jednak mają oni dostęp do lokalnego interfejsu sterowania (np. za pośrednictwem komputera), częściej dostosowują oświetlenie do swoich preferencji [71].

Akceptacja systemów automatycznego sterowania oświetleniem

Ręczne sterowanie oświetleniem jest powszechnie akceptowane przez użytkowników [86]. Wydaje się natomiast, że rosnąca automatyzacja systemów oświetleniowych koresponduje z coraz niższym stopniem akceptacji [86, 111]. Warunkiem koniecznym akceptacji systemów technicznych sterowania oświetleniem, wykorzystujących zarówno światło sztuczne jak i naturalne jest satysfakcja użytkowników z ich działania [77, 48]. Większość istniejących opracowań dotyczących automatycznego sterowania oświetleniem skupia się przede wszystkim na maksymalizacji jego wydajności energetycznej. Kwestie akceptacji i satysfakcji użytkowników były natomiast traktowane jako drugoplanowe, marginalizowane lub całkowicie pomijane [86, 111, 48]. Jednakże w ostatnich latach podejście to ulega zmianie [29, 80, 83, 11, 118, 110, 150, 77]. Obecnie, podobnie jak w przypadku pozostałych systemów budynku typu *smart*⁸, także w obszarze oświetlenia dąży się do „włączenia” użytkownika w system sterowania poprzez uwzględnienie informacji zwrotnej o jego preferencjach lub satysfakcji [86, 111].

⁸ Patrz: rozdz. 2.3, s. 38.

Dla zapewnienia wysokiej satysfakcji użytkowników i akceptacji systemu automatycznego sterowania oświetleniem w biurze, system taki powinien zapewniać [77, 257, 80, 248, 86, 93, 88]:

- pewien stopień ręcznego sterowania oraz możliwość wprowadzania korekt automatycznych działań,
- możliwość samodzielnego wprowadzania nastaw oświetlenia przez użytkowników, zgodnych z ich indywidualnymi preferencjami (także w pomieszczeniach wieloosobowych),
- prosty, przyjazny i łatwo dostępny interfejs komunikacji, oferujący intuicyjną obsługę i komunikację (również dla nieobytych z techniką użytkowników),
- realizację celów sterowania w sposób, który nie powoduje dyskomfortu oraz rozproszenia uwagi.

Ponadto użytkownicy powinni rozumieć cel i ogólny sposób działania systemu sterowania, a także powinni zostać przeszkoleni w zakresie jego prawidłowego użytkowania [258].

2.5. Biura na planie otwartym

Biuro na planie otwartym (*open-plan office, bull-pen office, open space*) to rodzaj biura wielkopowierzchniowego, w którym jedno pomieszczenie o otwartej przestrzeni jest zajmowane przez wielu pracowników [259, 48, 260]. Przeciwnieństwem tego typu układu przestrzennego jest organizacja przestrzeni formie biur prywatnych (pokoje przeznaczone dla jednego pracownika) lub biur komórkowych przeznaczonych dla zespołów (pokoje przeznaczone dla co najwyżej kilku pracowników) [261]. Historia biur na planie otwartym sięga końca XIX wieku, kiedy podczas rewolucji przemysłowej w Stanach Zjednoczonych, nastąpił wzrost zapotrzebowania na pracowników administracyjnych. Aby coraz liczniejsza karda pomieściła się na dotychczasowej przestrzeni tradycyjnego biura komórkowego zaczęto usuwać ściany działowe, a w ich miejsce wstawiano nowe biurka [262]. Obecnie, biura tego typu są już bardzo rozpowszechnione w wielu krajach świata. Przykładowo w Niemczech 40–50% pracowników jest zatrudnionych w biurach, a co najmniej 43% z nich pracuje w pomieszczeniach o co najmniej dziewięciu stanowiskach, uznawanych już za biura na planie otwartym [261]. W Polsce moda na biura tego typu zapanowała w latach 90, wraz z wkroczeniem zagranicznych firm na rodzimy rynek [262].

Wśród zalet biur na planie otwartym, względem tradycyjnych biur komórkowych lub prywatnych wymienia się [260, 263, 52]:

- maksymalne wykorzystanie dostępnej przestrzeni,
- niższe koszty inwestycji i eksploatacji w przeliczeniu na liczbę pracowników,
- otwarta przestrzeń sprzyja współpracy pracowników poprzez umożliwienie swobodnej komunikacji, wymiany pomysłów i integracji,
- szybki i bezpośredni przepływ informacji oraz dokumentów,

- ułatwiony dostęp do przełożonych.

Do wad biur na planie otwartym należy zaliczyć [260, 263, 52, 261, 262, 264, 265]:

- brak prywatności pracowników,
- wysoki poziom hałasu wywołanego np. rozmowami, pracą wentylacji, przemieszczaniem się osób, dzwonekami telefonów, odgłosami pracujących urzędów itp.,
- przerywanie pracy przez współpracowników,
- utrudniona koncentracja uwagi z powodu obecności czynników rozprasających,
- utrata indywidualizmu,
- wrażenie ciągłej kontroli, wywołane obecnością przełożonego w tym samym pomieszczeniu,
- niższa jakość powietrza i łatwiejsze rozprzestrzenianie się drobnoustrojów chorobotwórczych,
- dyskomfortowe warunki środowiskowe odczuwane przez część pracowników,
- trudności (techniczne i społeczne) w sterowaniu warunkami środowiskowymi w pomieszczeniu,
- obniżenie wydajności pracy, podatność na stres, zmęczenie i rozdrażnienie.

W celu uzyskania kompromisu pomiędzy pracą we wspólnym pomieszczeniu typu *open space*, a pracą indywidualną w odosobnieniu, biura wielkopowierzchniowe organizuje się także w formie boksów (*cubicle office*) utworzonych poprzez separację poszczególnych stanowisk pracy za pomocą wysokich przegród [266, 260, 48]. Osłona poprawia komfort pracy ograniczając wizualne i akustyczne czynniki rozprasające, zwiększa poczucie prywatności, terytorialność i ułatwia indywidualną aranżację stanowiska pracy. Uważa się, że system boksów ułatwia wdrożenie rozwiązań z zakresu niezależnego sterowania warunkami mikroklimatycznymi stanowiska pracy (w zakresie oświetlenia, temperatury i wymiany powietrza) według indywidualnych potrzeb [266]. Wadą tego systemu jest z kolei trudność w orientacji – wywołuje on wrażenie labiryntu [266]. Boksy biurowe są szczególnie popularne w USA [259], podczas gdy w Europie dominują biura typu *open space* bez przegród między stanowiskami [51, 259]. Porównanie wyglądu obu rodzajów biur pokazano na rysunku 7.

Biura na planie otwartym są zróżnicowane pod względem cech fizycznych, np. powierzchni i wysokości pomieszczenia, jakości mikroklimatu wewnętrznego, rozmiaru pojedynczego stanowiska pracy, separacji między stanowiskami, rozmieszczenia i gęstości przestrzennej stanowisk. Także sam proces pracy, różni się znacznie między organizacjami [261]. Dlatego w biurach tego typu funkcjonują różne modele przydzielania pracownikom indywidualnych stanowisk pracy. Zasadniczo stanowisko pracy może być przypisane na stałe jednemu użytkownikowi (*home base*) lub współużytkowane przez różnych pracowników jako [266]:

- stanowisko pracy współużytkowane (*shared assigned, desk sharing, shared space*) – pojedyncze stanowisko jest przypisane do kilku konkretnych użytkowników (konieczne jest wcześniejsze ustalenie czasu użytkowania),
- ruchome stanowisko pracy w ramach budynku (*free address, hot desking, red carpet*) – stanowiska mogą być dowolnie zajmowane przez pracowników po przybyciu do biura,
- stanowisko pracy wynajmowane (*motelling*) – stanowiska są przydzielane pracownikom po przybyciu do biura i zgłoszeniu przez nich zapotrzebowania,
- stanowisko pracy wynajmowane po wcześniejszej rezerwacji (*just in time, hotelling*) – pracownicy rezerwują stanowiska z wyprzedzeniem na określony czas,
- zastępcze stanowisko pracy (*drop in*) – przeznaczone do krótkotrwałej pracy biurowej, w przypadku gdy stanowiska innego typu są zajęte.



Rysunek 7. Różne modele biura wielkopowierzchniowego: całkowicie otwarta przestrzeń biura typu open space (po lewej) oraz boksy biurowe wyposażone w przegrody rozdzielające stanowiska (po prawej) [47]

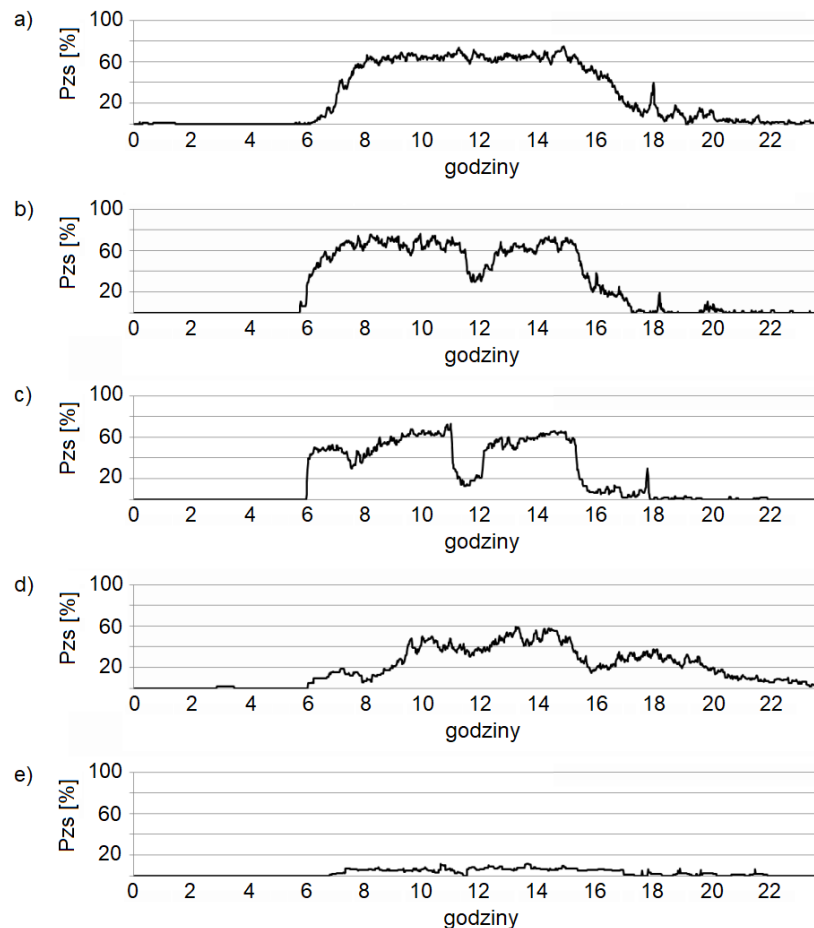
2.6. Schematy obecności ludzi w przestrzeniach biurowych

Poza opisaną w rozdziale 2.4 akceptacją dla systemów automatycznego sterowania, ludzie wywierają wpływ na efektywność energetyczną budynku także poprzez różne schematy obecności.

Poziom aktywności ludzi zmienia się w ciągu dnia, a także jest odmienny u różnych osób [267]. Pracownicy biur rozpoczynają i kończą pracę o różnych porach, a także korzystają z różnej liczby przerw w ciągu dnia [267, 48]. Niektórzy pracownicy wielokrotnie, w sposób nieregularny opuszczają swoje stanowiska pracy w ciągu dnia. Schematy obecności poszczególnych pracowników przy stanowiskach mają więc silnie stochastyczny charakter i są bardzo zróżnicowane [68, 268, 269]. W przyszłości, różnice te będą się prawdopodobnie pogłębiały, ze względu na wprowadzanie bardziej elastycznego stylu pracy, który daje pracownikom większą swobodę wyboru jej czasu i miejsca (możliwość pracy poza biurem) [48, 270]. Także stanowiska pracy coraz częściej nie są przypisane konkretnym pracownikom, lecz mogą być wykorzystywane

w sposób elastyczny przez wiele osób⁹. W konsekwencji zajętość pomieszczeń i poszczególnych stanowisk pracy ulega dynamicznym zmianom.

Na podstawie badań przeprowadzonych w USA w funkcjonujących biurach (czujnik obecności pracownika w każdym z 200 boksów biurowych), zidentyfikowano pięć typowych schematów obecności pracowników przy stanowiskach pracy (w dni robocze) [269], które przedstawiono na rysunku 8. Schematy te są warunkowane między innymi rodzajem stanowiska, na którym zatrudnieni są pracownicy [268].



Rysunek 8. Schematy obecności pracowników przy stanowiskach pracy: a) stale obecny, b) obecny poza jedną regularną przerwą, c) obecny poza dwiema regularnymi przerwami, d) obecny w sposób nieregularny, e) obecny sporadycznie w sposób nieregularny; Pzs – prawdopodobieństwo zajęcia stanowiska [269].

Najbardziej typowy dla biur jest schemat 2 (patrz rysunek 8b), który reprezentuje pracownika spędzającego większość dnia przy swoim stanowisku pracy, korzystającego z jednej długiej przerwy obiadowej w godzinach okołopołudniowych [269, 68]. W schemacie tym wyróżnić można kilka charakterystycznych okresów [271, 68]:

- noc,
- przybywanie pracowników do biura,

⁹ Patrz: rozdz. 2.5, s. 49.

- praca w godzinach przedpołudniowych,
- przerwa obiadowa w południe,
- praca w godzinach popołudniowych,
- opuszczanie biura przez pracowników.

W kontekście sterowania oświetleniem na poziomie całego pomieszczenia, można określić dwa zasadnicze schematy użytkowania pomieszczenia [189]:

- ciągły (*continuous usage pattern*) – przynajmniej jedna osoba jest stale obecna w normalnych godzinach użytkowania pomieszczenia,
- dyskretny (*discrete usage pattern*) – pomieszczenie jest czasowo opuszczane przez wszystkie osoby w normalnych godzinach jego użytkowania.

Im liczniejsza grupa osób pracujących w danym pomieszczeniu tym bardziej ciągły jest schemat jego użytkowania [189].

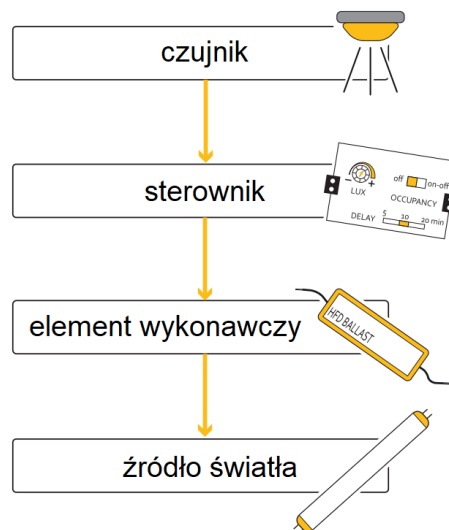
Opracowano różne narzędzia umożliwiające symulacje i prognozowanie zużycia energii przez budynek oraz poszczególne jego instalacje. Jednakże różnice między szacowaną wartością, a rzeczywistym zużyciem energii przez budynek przekraczają przeważnie 30%, a w niektórych przypadkach sięgają nawet 100% [68] lub 300% [73]. Spośród czynników wpływających na energochłonność budynku¹⁰ uwarunkowania klimatyczne i techniczne są stosunkowo dobrze uwzględniane w obliczeniach. Ze względu na stochastyczny charakter obecności użytkowników i zmienność ich interakcji z budynkiem, za krytyczny czynnik stanowiący główną przyczynę odchyień prognoz uznaje się zachowanie użytkowników [68, 72, 272, 112, 73].

2.7. Identyfikacja metod sterowania oświetleniem mających na celu poprawę efektywności energetycznej

Systemy sterowania oświetleniem są istotną częścią instalacji oświetleniowych. Ich głównym zadaniem jest sterowanie wydajnością systemu oświetlenia w celu obniżenia zużycia energii elektrycznej, bez szkody dla komfortu wzrokowego [258]. Na system sterowania oświetleniem składają się cztery podstawowe elementy (patrz rysunek 9) [86]:

- czujnik – zbiera informacje o otoczeniu (zazwyczaj dotyczące obecności ludzi lub natężenia oświetlenia) i przetwarza je na sygnały elektryczne,
- sterownik – odbiera i przetwarza informacje z czujnika, a następnie wysyła sygnał sterujący do elementu wykonawczego,
- element wykonawczy – najczęściej statecznik lub układ zasilający LED, który włącza, wyłącza lub dostosowuje parametry źródła światła (np. strumień świetlny, temperaturę barwową),
- źródło światła – emituje światło o żądanych parametrach.

¹⁰ Patrz: rozdz. 1.2, s. 17.



Rysunek 9. Elementy systemu sterowania oświetleniem [86].

Obecnie znanych jest wiele metod sterowania oświetleniem, które różnią się sposobem działania, możliwościami sterowania, złożonością instalacji, kosztem, wpływem na poprawę komfortu pracy i uzyskiwanymi oszczędnościami energii. Zasadniczo metody te wykorzystują włączanie / wyłączenie oświetlenia, regulację strumienia świetlnego (ściemnianie), ustawianie scen świetlnych oraz regulację temperatury barwowej [16, 33, 31, 128, 77, 273, 274, 275, 258].

W normie PN–EN 15232 [33] zdefiniowano szczegółowe funkcje realizowane przez system BACS w obszarze sterowania oświetleniem, wpływające na efektywność energetyczną instalacji oświetleniowej budynku. Zasadniczo dzielą się one na sterowanie od zajętości pomieszczenia oraz sterowanie od światła dziennego. W ramach sterowania od zajętości pomieszczenia można wyróżnić następujące metody:

- ręczne załączanie / wyłączenie – oświetlenie jest załączane i wyłączane ręcznym łącznikiem w pomieszczeniu,
- ręczne załączanie / wyłączenie oraz dodatkowe automatyczne centralne wyłączenie ogólne – oświetlenie jest załączane i wyłączane ręcznym łącznikiem w pomieszczeniu; dodatkowo oświetlenie jest automatycznie wyłączone co najmniej raz dziennie zgodnie z określonym harmonogramem czasowym (najczęściej wieczorem, aby zapobiec jego niepotrzebnej pracy w nocy),
- automatyczne wykrywanie, w ramach którego mogą być realizowane warianty sterowania:
 - automatyczne załączanie / automatyczne ściemnianie strefowe / wyłączenie – w przypadku wykrycia obecności w oświetlanej strefie, system sterowania automatycznie załącza oświetlenie; następnie oświetlenie jest automatycznie ściemniane (nie później niż po upływie 10 min od ostatniej wykrytej obecności w oświetlanej strefie pomieszczenia); oświetlenie jest automatycznie wyłączane całkowicie

- nie później niż po upływie 20 min od ostatnio wykrytej obecności w pomieszczeniu jako całości,
- automatyczne załączanie / wyłączenie – w przypadku wykrycia obecności w oświetlanym obszarze, system sterowania automatycznie załącza oświetlenie; oświetlenie jest automatycznie wyłączane całkowicie nie później niż po upływie 10 min od ostatnio wykrytej obecności w oświetlanej strefie,
 - ręczne lub częściowe automatyczne załączanie / automatyczne ściemnianie strefowe / wyłączenie – oświetlenie jest załączane ręcznie przez użytkownika lub automatycznie w przypadku wykrycia obecności – odpowiednio łącznik bądź czujnik obecności znajdują się w oświetlanej strefie lub jej pobliżu; jeżeli nie zostanie ręcznie wyłączone, w przypadku wykrycia absencji użytkownika oświetlenie jest automatycznie ściemniane (nie później niż po upływie 10 min od ostatniej wykrytej obecności w oświetlanej strefie pomieszczenia); oświetlenie jest automatycznie wyłączane całkowicie nie później niż po upływie 20 min od ostatnio wykrytej obecności w pomieszczeniu jako całości,
 - ręczne lub częściowe automatyczne załączanie / automatyczne wyłączenie – oświetlenie jest załączane ręcznie przez użytkownika lub automatycznie w przypadku wykrycia obecności – odpowiednio łącznik bądź czujnik obecności znajdują się w oświetlanej strefie lub jej pobliżu; jeżeli nie zostanie ręcznie wyłączone, w przypadku wykrycia absencji użytkownika oświetlenie jest automatycznie wyłączane całkowicie (nie później niż po upływie 20 min od ostatnio wykrytej obecności w oświetlanej strefie).

Przy automatycznym ściemnianiu strefowym oświetlenie powinno być ściemnione do poziomu nie wyższego niż 30% stanu normalnego¹¹ (stan zredukowanego naświetlenia). W ramach sterowania od światła dziennego można wyróżnić następujące metody:

- centralne ręczne załączanie / ściemnianie / wyłączenie – system automatycznego sterowania nie uwzględnia światła dziennego; możliwość centralnego ręcznego dostosowania natężenia oświetlenia sztucznego, brak łączników / regulatorów w pomieszczeniu,
- ręczne załączanie / wyłączenie – system automatycznego sterowania nie uwzględnia światła dziennego; możliwość ręcznego wyłączenia oświetlenia za pomocą łącznika w pomieszczeniu,

¹¹ W poprzedniej edycji normy PN-EN 15232 z 2012 r. [293] stan zredukowanego naświetlenia definiowany był jako poziom nie wyższy niż 20% stanu normalnego.

- automatyczne załączanie / wyłączenie – oświetlenie jest automatycznie wyłączane gdy ilość światła dziennego w pomieszczeniu jest wystarczająca oraz automatycznie załączane w przypadku jego niedostatecznej ilości,
- automatyczne rozjaśnianie / ściemnianie – oświetlenie jest automatycznie ściemniane, aż do całkowitego wyłączenia, gdy ilość światła dziennego w pomieszczeniu rośnie oraz automatycznie załączane i rozjaśniane, gdy ilość światła dziennego w pomieszczeniu ulega obniżeniu.

Rozmiar niezależnie sterowanych stref oświetleniowych

Sterowanie oświetleniem ogólnym w pomieszczeniu biurowym może być realizowane na poziomie [276, 48, 167, 146]:

- całego pomieszczenia,
- strefy pomieszczenia,
- lokalnym.

Warianty te uzyskuje się dzięki odpowiedniej organizacji lamp oraz czujników.

Najprostszą, a zarazem najczęściej stosowaną metodą jest jednoczesne centralne sterowanie wszystkimi lampami w obrębie pomieszczenia [268]. Przy sterowaniu od zajętości, metoda ta dobrze sprawdza się w pokojach małych, takich jak biura prywatne lub komórkowe, gdzie zachodzi potrzeba wykrycia obecności tylko jednego lub co najwyżej kilku pracowników. W dużych, wieloosobowych pomieszczeniach stosuje się kilka czujników pokrywających zasięgiem całe pomieszczenie. W efekcie, po wykryciu obecności pojedynczej osoby oświetlenie jest uruchamiane w całej przestrzeni, a automatyczne wyłączenie jest realizowane dopiero po opuszczeniu biura przez ostatniego pracownika [47, 277].

W celu poprawy skuteczności energetycznej sterowania, duże pomieszczenia dzieli się na niezależnie kontrolowane strefy, które są obsługiwane przez grupę lamp i pojedyncze czujniki. Przy sterowaniu od zajętości, kiedy dana strefa zostanie opuszczona przez ludzi, jej oświetlenie jest automatycznie przyciemniane lub wyłączane niezależnie od pozostałych stref. W przypadku sterowania od światła dziennego, kolejne strefy organizowane są zazwyczaj wraz z rosnącą odległością od okien. Strefy te mogą być niezależnie włączane/wyłączane lub ściemniane w zależności od ilości światła dziennego [146]. Taki podział umożliwia także niezależną regulację ściemnienia grup lamp według potrzeb użytkowników [278].

Im mniejsze strefy sterowane niezależnie, tym wyższa „rozdzielczość” możliwych do wytworzenia warunków oświetleniowych w obrębie pomieszczenia, a tym samym wyższy potencjał energooszczędności – energia może być precyzyjniej kierowana do miejsc jej zapotrzebowania. Największe możliwości optymalizacji zużycia energii w dużych pomieszczeniach oferuje sterowanie na poziomie lokalnym – poszczególnych stanowisk pracy [268, 47]. Jest ono realizowane poprzez sterowanie siatką niezależnie ściemnianych lamp i dzięki temu zapewnia swobodę kreowania

rozkładu natężenia oświetlenia w pomieszczeniu. Sterowane tego typu umożliwiają na przykład poprawę równomierności oświetlenia pomieszczenia, bądź oświetlanie pewnych obszarów przestrzeni mocniej niż innych (np. ściemnianie niepotrzebnego oświetlenia, bądź dążenie do zaspokojenia specyficznych potrzeb oświetleniowych użytkowników pomieszczeń wieloosobowych). Lokalne sterowanie oświetleniem może być także określane jako sterowanie rozkładem natężenia oświetlenia lub sterowanie dystrybucją światła. W literaturze zagranicznej spotykane są również określenia takie jak: *highly granular lighting control* [259] lub *spatial / localized illumination rendering* [279, 184].

Badania potwierdzają, że reagowanie na zajętość stref obejmujących pojedyncze biurka, wykazuje znacznie wyższy potencjał oszczędności energii niż strategię obejmujące większe strefy [268]. Jednakże w niektórych biurach, gdzie schematy zajętości poszczególnych stanowisk są podobne, oszczędności uzyskane dzięki tej strategii mogą nie przewyższyć nakładów inwestycyjnych i wysiłków projektowych w porównaniu ze sterowaniem na poziomie całego pomieszczenia [268].

Ręczne sterowanie oświetleniem

Ręczne włączanie i wyłączanie oraz ściemnianie oświetlenia za pomocą łączników / manipulatorów stanowi najprostszy system sterowania oświetleniem. W takim systemie czujnikiem jest oko ludzkie, sterownikiem – mózg, elementem wykonawczym – ręka oraz manipulator [86]. W przypadku tej metody sterowania, możliwe do uzyskania oszczędności energetyczne wynikają tylko i wyłącznie z zachowania użytkownika [280], a sposób użytkowania oświetlenia ma istotny wpływ na zużycie energii przez budynek [70].

Pracownicy biur zwykle włączają oświetlenie w momencie przyścia do pracy i pozostawiają je włączone przez cały dzień, z niezmiennym poziomem ściemnienia. Zazwyczaj oświetlenie jest wyłączone dopiero na koniec dnia pracy, kiedy pracownicy opuszczają biuro. Dzieje się tak, nawet gdy ilość światła naturalnego w ciągu dnia jest wystarczająca [75, 76, 44, 77, 80, 79, 70, 78, 281, 86]. Tylko część osób uzależnia decyzję o włączeniu oświetlenia od dostępności światła dziennego – są to głównie osoby pracujące w pobliżu okien, które rzadziej włączają światło sztuczne gdy poziom oświetlenia naturalnego jest wysoki. Nie zaobserwowano natomiast podobnej korelacji w odniesieniu do wyłączenia oświetlenia [282, 271, 76, 78, 86, 283]. Dlatego też, w budynkach biurowych, w których oświetlenie jest sterowane ręcznie, jako najistotniejszy czynnik decydujący o użyciu oświetlenia uważa się schematy obecności użytkowników¹².

W skrajnym przypadku oświetlenie może pozostawać włączone przez całą noc, pomimo że nikogo nie ma już w biurze [83, 275]. Nieuzasadniona praca oświetlenia prowadzi do marnotrawstwa energii, a także niepotrzebnego zużycia lamp [77, 80].

¹² Patrz: rozdz. 2.6, s. 50.

Jako powody pozostawiania włączonego oświetlenia podczas opuszczania pomieszczenia podaje się [77, 83, 80, 79, 282]:

- zajętość, brak czasu,
- zapominanie, że oświetlenie jest włączone,
- niedostatek wiedzy o sposobie wyłączenia oświetlenia.

Takie zachowanie ma swoje odzwierciedlenie w profilu zużycia energii przez budynek – jak pokazują badania, w budynkach komercyjnych zużywa się średnio więcej energii elektrycznej poza godzinami pracy (56%), niż w godzinach pracy (44%) [69]. Przyczynia się do tego w dużej mierze pozostawianie włączonego oświetlenia i sprzętu biurowego po zakończeniu dnia pracy.

Czynnikami sprzyjającym ograniczaniu zużycia energii przy ręcznym sterowaniu oświetleniem są łatwa dostępność łączników i manipulatorów (zaleca się, aby jeden łącznik sterował oprawami położonymi nie dalej niż 6m od niego), a także ograniczenie liczby lamp sterowanych jednym łącznikiem poprzez wydzielanie niezależnych stref [86, 32, 258]. W przypadku ręcznego ściemniania ludzie mają zróżnicowane upodobania w zakresie preferowanego natężenia oświetlenia, jednak dla oszczędności energii istotny może być odpowiedni dobór zakresu regulacji oraz nastawy początkowej przy ściemnianiu¹³.

Regulacja instytucjonalna

Regulacja instytucjonalna (*institutional tuning*) nazywana także regulacją zadaniową (*task tuning*) polega na ogólnym obniżeniu natężenia oświetlenia w poszczególnych pomieszczeniach lub ich strefach do poziomu rekomendowanego w normach lub preferowanego przez użytkowników dla danego typu zadań wzrokowych [281]. Możliwość ta wynika z faktu, że pierwotnie zaprojektowane poziomy oświetlenia (wraz z dobranym współczynnikiem zapasu), bywają wyższe niż potrzeby przy aktualnym sposobie wykorzystywania pomieszczenia. Optymalizacja natężeń i jednorodności przestrzennej oświetlenia, może przynieść dodatkowe oszczędności energii podczas obecności użytkowników, bez negatywnego wpływu na ich satysfakcję [48, 163]. Strategia ta może być dowolnie łączona z metodami automatycznego sterowania oświetleniem, lecz dzięki ograniczeniu maksymalnych nastaw lamp skutkuje trwałymi oszczędnościami energii (patrz tabela 3). Strategia ta wymaga wyposażenia instalacji oświetleniowej w ściemniające lampy oraz odpowiedniej jej organizacji i konfiguracji [284]. Aby skompensować obniżanie się strumienia świetlnego na skutek starzenia lamp wymagana jest okresowa regulacja systemu¹⁴ [281].

¹³ Patrz: rozdz. 3.2, s. 85.

¹⁴ Kompensacja ta może być także realizowana automatycznie, co zostało dokładniej opisane w podrozdziale 2.7, s. 70.

Tabela 3. Oszczędności energii na oświetlenie w biurach uzyskiwane dzięki regulacji instytucjonalnej.

| metoda badania: S – symulacja komputerowa, M – metaanaliza | oszczędności energii [%] | warunki badania, uwagi | źródło |
|--|--------------------------|---|--------|
| S | 18 – 22 | niezależne sterowanie lampami w celu optymalizacji rozkładu natężenia oświetlenia na obszarze zadania obejmującym całe pomieszczenie; 22% przy 500 lx i równomierności 0,64, 18% przy 517 lx i równomierności 0,77; B: lampy załączone (635 lx, równomierność 0,61) | [169] |
| M | 36 | przeciętne oszczędności energii na podstawie 11 publikacji zawierających wyniki uzyskane eksperymentalnie | [284] |

Regulacja indywidualna

Regulacja indywidualna (*personal tuning*), nazywana także ściemnianiem indywidualnym polega na zastosowaniu systemu oświetleniowego umożliwiającego lokalne dostosowanie ustawień oświetlenia poszczególnych stanowisk pracy do indywidualnych upodobań i preferowanego rozkładu luminancji [196, 284]. Metoda ta prowadzi do wytworzenia spersonalizowanych (indywidualnych) warunków oświetleniowych, a przez to uzyskania indywidualnej wygody widzenia. Jednocześnie zapewnia także dodatkowe oszczędności energii podczas obecności użytkowników, które wynikają z pracy przynajmniej części lamp w stanie zredukowanego naświetlania.

Sterowanie tego typu może znaleźć zastosowanie przede wszystkim w przestrzeniach biurowych [284]. W jednoosobowych biurach prywatnych regulacja indywidualna może być realizowana na poziomie całego pomieszczenia za pomocą prostego ściemniacza. Natomiast, w pomieszczeniach wieloosobowych niezbędny jest system umożliwiający lokalną, niezależną regulację poziomów oświetlenia poszczególnych stanowisk pracy, w celu zaspokojenia specyficznych potrzeb oświetleniowych.

Spersonalizowane sterowanie oświetleniem jest przedmiotem badań już od ponad dwóch dekad, jednak dotychczasowe prace dotyczyły przede wszystkim biur prywatnych oraz wieloosobowych wyposażonych w boksy [51]. W biurach typu *open space* ta forma sterowania oświetleniem jest stosunkowo młodą dziedziną badań [51]. W kraju tematyka ta nie była do tej pory podejmowana.

W tabeli 4 przedstawiono oszczędności energii możliwe do uzyskania w biurach poprzez indywidualną regulację oświetlenia. W literaturze rozważano najczęściej biura prywatne. Analizowano także oszczędności energii w biurach wyposażonych w indywidualne boksy. Biura typu *open space* były do tej pory przedmiotem badań jedynie o charakterze symulacyjnym, w których zakładano, że wszyscy użytkownicy preferują ta samą wartość natężenia oświetlenia.

Tabela 4. Oszczędności energii na oświetlenie w biurach uzyskiwane dzięki regulacji indywidualnej.

| metoda badania: E – eksperyment, M – metaanaliza | oszczędności energii [%] | warunki badania, uwagi; B – odniesienie dla kalkulacji oszczędności energii | źródło |
|--|--------------------------|--|--------|
| E | 5 – 20 | 86 boksów biurowych monitorowanych przez 1 rok; Burnaby (Kanada); B: lampy załączone w godzinach pracy | [254] |
| E | 8 | 9 boksów biurowych monitorowanych przez 1 rok; USA; B: lampy załączone w godzinach pracy; oszczędności uzyskano pomimo podniesienia mocy zainstalowanej systemu o 50% | [253] |
| E | 9 | biura prywatne; San Francisco (USA); B: ręczne załączanie i wyłączanie oświetlenia | [281] |
| S | 11,2 – 56,6 | biuro typu <i>open space</i> , sterowanie lokalne – na poziomie poszczególnych stanowisk; założenie: wszyscy użytkownicy preferują takie samo natężenie oświetlenia; 11,2% dla nastawy 350 lx (traktowanej przez autorów jako najbardziej komfortowa), 30,7% dla nastawy 300 lx, 56,6% dla nastawy 200 lx; B: lampy załączone w godzinach pracy (8:00–17:00) | [163] |
| E | 15 | 81 biur prywatnych, bez okien, Boulder (Colorado, USA); B: lampy załączone w godzinach pracy (10h/dobę) | [256] |
| E | 25 | biuro prywatne, Ottawa (Kanada); B: lampy załączone w godzinach pracy (7h/dobę) | [255] |
| S | 28 | biuro typu <i>open space</i> , sterowanie lokalne – na poziomie poszczególnych stanowisk; założenie: wszyscy użytkownicy preferują takie samo natężenie oświetlenia wynoszące 350 lx; B: wszystkie lampy załączone | [285] |
| M | 35 | przeciętne oszczędności energii na podstawie 13 publikacji zawierających wyniki uzyskane eksperymentalnie | [284] |
| E | 35 – 42 | biura prywatne, bez okien; 18 uczestników wykonywało te same zadania; B: oświetlenie bez możliwości ściemniania | [286] |

Sceny świetlne

Sceny świetlne (*pre-set scenes*) stanowią funkcję instalacji oświetleniowej umożliwiającą zapamiętanie i późniejsze szybkie przywoływanie specjalnych ustawień oświetlenia w pomieszczeniu (scen świetlnych), dostosowanych dla różnych sytuacji i rodzajów podejmowanych w ciągu dnia aktywności [196, 258]. Przykładowo w sali konferencyjnej lub pokoju spotkań aktywność pracowników może zmieniać się od prezentacji multimedialnej, przez dyskusję uczestników, aż do indywidualnej pracy z dokumentami lub komputerem. Z kolei w biurze, stanowiska są wykorzystywane zarówno do czytania, pisania, pracy z komputerem jak i dyskusji z współpracownikami lub gośćmi [196, 258]. Dana scena świetlna stanowi informację o stanie załączenia, wyłączenia lub poziomów ściemnienia lamp lub grup lamp w pomieszczeniu, a także o ustawieniu przesłon ograniczających dopływ światła dziennego. Zasadniczo możliwość ustawiania scen świetlnych ma służyć poprawie komfortu użytkownika

pomieszczenia, jednak ponieważ część lamp pozostaje ściemniona lub wyłączona, funkcja ta prowadzi również do oszczędności energii.

Automatyczne sterowanie oświetleniem

W ostatniej dekadzie coraz powszechniejsze stosowanie źródeł LED spowodowało obniżenie ilości energii zużywanej przez oświetlenie, zasadniczo bez negatywnych konsekwencji dla jakości wytwarzanych warunków oświetleniowych [276, 287, 197, 246]. Uważa się jednak, że w wyniku wzrostu skuteczności świetlnej źródeł światła, ludzie mniej przejmują się zużyciem energii na cele oświetleniowe, co może prowadzić do bardziej energochłonnych schematów użytkowania oświetlenia. Ponadto, przywoływane wyniki badań, wskazują na niską skłonność użytkowników biur do ręcznego, energooszczędnego sterowania oświetleniem. Dlatego też, obecnie coraz istotniejszą rolę w projektowaniu oświetlenia odgrywają systemy automatycznego sterowania lampami w zależności od rzeczywistego zapotrzebowania na światło. Głównymi zmiennymi determinującymi te potrzeby są [276]:

- obecność użytkowników w przestrzeni pomieszczenia (zajętość pomieszczenia),
- ilość dostępnego światła dziennego.

Automatyczny system sterowania oświetleniem jest bardziej skomplikowany w instalacji i kosztowny od sterowania ręcznego, lecz zapewnia funkcje podnoszące komfort pracy i użytkowania pomieszczeń, a także znaczne oszczędności energii. Układ cyfrowy przejmuje od użytkownika konieczność „pamiętania” o wyłączeniu oświetlenia oraz wyręcza go w regulacji jego natężenia. Istotne jest, aby system automatycznego sterowania oświetleniem poza zapewnianiem wysokich oszczędności energii, był także w pełni akceptowalny dla użytkowników (patrz rozdział 2.4).

Ze względu na sposób organizacji, systemy automatycznego sterowania oświetleniem można podzielić na [28]:

- zdecentralizowane – każda oprawa oświetleniowa jest wyposażona we własny moduł czujników oraz sterownik; dane są pozyskiwane i przetwarzane lokalnie w celu sterowania zabudowanym w tej samej oprawie źródłem światła, niezależnie od innych lamp lub systemów,
- scentralizowane – sygnały ze wszystkich czujników w obrębie danej strefy są przesyłane do centralnego sterownika, który przetwarza je i określa nastawy, które następnie są przesyłane do poszczególnych lamp / grup lamp,
- rozproszone – każda oprawa lampa może komunikować się z innymi znajdującymi się w pobliżu, bez udziału centralnego sterownika.

System sterowania oświetleniem może być także zintegrowany z innymi systemami budynku typu *smart* i współdziałać przykładowo z systemem ruchomych przestron zacinających, bądź systemami bezpieczeństwa (wykorzystując wspólne czujniki wykrywające obecność osób).

W dalszej części rozdziału zostaną scharakteryzowane podstawowe metody automatycznego sterowania oświetleniem, wraz z ich wpływem na poprawę efektywności energetycznej instalacji oświetleniowej budynku.

Automatyczne sterowanie oświetleniem w zależności od zajętości

Automatyczne sterowanie oświetleniem w zależności od zajętości pomieszczenia (*occupancy control*) może bazować na:

- harmonogramach czasowych,
- wykrywaniu zajętości pomieszczenia.

Harmonogramy czasowe są powszechnie używane do sterowania oświetleniem w zastosowaniach zewnętrznych. W oświetleniu wewnątrz są stosowane stosunkowo rzadko [167, 284]. Ich działanie polega na wyłączeniu lub włączeniu i wyłączeniu oświetlenia w określonych chwilach czasowych, zgodnie z ustalonym harmonogramem [288, 274, 168]. Metody te znajdują zastosowanie szczególnie w pomieszczeniach użytkowanych regularnie, w ściśle zdefiniowanych porach, gdzie detekcja zajętości jest niepraktyczna [288, 168]. W biurach, zastosowanie harmonogramów czasowych może obejmować między innymi automatyczne [289, 86, 288]:

- wyłączenie oświetlenia (części lub wszystkich lamp) w porze lunchu lub po godzinach użytkowania biura,
- załączenie oświetlenia przed przybyciem pracowników do biura lub po zakończonej porze lunchu.

Sterowanie oświetleniem zgodnie z harmonogramami czasowymi prowadzi do oszczędności energii rzędu 10-40% [289]. Ze względu na komfort pracowników, działania systemu powinny być wykonywane poza godzinami użytkowania biura, a osoby pozostające dłużej przy stanowisku pracy powinny mieć możliwość ręcznego utrzymania pracy oświetlenia [275].

Podczas dnia pracy dodatkowe oszczędności energii może zapewnić sterowanie wykorzystujące automatyczne wykrywanie zajętości pomieszczenia, które może być realizowane w zależności od [195, 274, 86, 258]:

- obecności użytkownika,
- nieobecności (absencji) użytkownika.

W pierwszym wariantcie oświetlenie jest automatycznie załączane w chwili wykrycia obecności użytkownika w danej strefie, natomiast w drugim wariantcie oświetlenie musi zostać załączone ręcznie [148, 258]. W obu przypadkach światło jest automatycznie wyłączane w danej strefie lub ściemniane w danej strefie, a następnie wyłączane w całym pomieszczeniu, gdy w ustawionym przedziale czasu (czasie zwłoki – *time delay*), w oświetlanym obszarze nie zostanie wykryta obecność użytkownika [47, 290, 190, 267, 113]. Im ten czas jest dłuższy, tym więcej energii jest marnowane, ponieważ oświetlenie pozostaje włączone mimo, że nikogo nie ma już w oświetlanej przestrzeni. Z kolei krótszy czas [168, 267, 190, 291, 190, 48, 253, 83, 292]:

- zwiększa oszczędności energii elektrycznej,
- skraca łączny czas pracy lamp, co może wydłużyć okres między ich wymianami,
- zwiększa liczbę nieuzasadnionych wyłączeń oświetlenia, gdy czujniki nie są w stanie wykryć ruchu obecnych pracowników,
- zwiększa liczbę operacji łączeniowych, co może negatywnie wpływać na trwałość lamp oraz łączników elektrycznych.

W poprzedniej edycji normy PN-EN 15232 z 2012 r. [293] zalecany czas zwłoki od ostatniej wykrytej obecności wynosił co najwyżej 5 minut, natomiast w ostatnim wydaniu tej normy z 2017 r. [33] czas ten wydłużono i wynosi on obecnie co najwyżej 10 lub 20 min w zależności od funkcji, której dotyczy. W praktyce, zazwyczaj stosowany jest czas zwłoki 15–20 minut, co znacząco redukuje liczbę nieprawidłowych wyłączeń oświetlenia [148, 267, 268].

W celu detekcji zajętości pomieszczenia lub jego stref wykorzystuje się rozmaite czujniki, bazujące na różnych zjawiskach fizycznych. Metody detekcji znajdujące zastosowanie w biurach, wraz z ich zaletami, wadami oraz optymalnym zastosowaniem przedstawiono w tabeli 5. W praktyce sterowania oświetleniem najczęściej stosowane metody detekcji osób bazują na czujnikach ruchu wykorzystujących podczerwień (PIR) lub ultradźwięki [168, 145, 290, 48, 294, 86, 28]. Rzadziej stosowane są czujniki mikrofalowe lub wykrywanie dźwięków słyszalnych [145]. W celu redukcji liczby fałszywych detekcji, przykładowo na skutek wykrycia ruchu osób poza pomieszczeniem przez otwarte drzwi, stosowane są także czujniki łączące te metody w jednym urządzeniu [145, 295, 86]. Zasada działania pasywnych czujników podczerwieni opiera się na wykrywaniu ruchu na podstawie zmian w rozkładzie promieniowania podczerwonego w polu widzenia, natomiast czujniki ultradźwiękowe i mikrofalowe wykorzystują efekt Dopplera – wykrywają zmiany długości fali odbitej od poruszającego się obiektu [148, 168, 145, 294, 295, 28]. W budynkach typu *smart*, dzięki integracji systemów, czujniki wykorzystywane w sterowaniu oświetleniem są współwykorzystywane przez inne systemy budynku (np. systemy bezpieczeństwa lub zapewniające komfort klimatyczny), co redukuje liczbę czujników i usprawnia proces zarządzania usługami budynku. [56, 31, 86].

Innymi znanymi metodami wykorzystywanymi w wykrywaniu zajętości pomieszczeń w celu sterowania procesami w budynku są: pomiar stężenia CO₂ lub lotnych związków organicznych (VOC), analiza danych z liczników energii typu *smart*, wykrywanie zmian ciśnienia powietrza, a także informacje pozyskiwane z czujników oświetlenia, dźwięku, temperatury, wilgotności lub otwarcia drzwi [145, 114, 296, 28]. Ze względu na charakterystykę lub długi czas wykrywania, metody te praktycznie nie są wykorzystywane w sterowaniu oświetleniem. Prowadzone są także prace nad wykorzystaniem sieci WiFi w wykrywaniu obecności [28].

Tabela 5. Zestawienie metod znajdujących zastosowanie w wykrywaniu zajętości pomieszczenia lub jego stref na potrzeby sterowania oświetleniem [148, 168, 145, 290, 48, 176, 297, 295, 298, 28].

| technologia | zalety | wady | optymalne zastosowanie |
|--|---|---|---|
| pasywne czujniki podczerwieni – PIR (<i>passive infrared sensors</i>) | - względnie niski koszt - niska nachalność | - brak detekcji gdy ludzie pozostają w bezruchu - brak wykrywania ruchu za przeszkodami | - biura prywatne lub komórkowe, - boksy biurowe |
| czujniki ultradźwiękowe i mikrofalowe | - względnie niski koszt - niska nachalność - wykrywanie ruchu również za przeszkodami | - brak detekcji gdy ludzie pozostają w bezruchu - skłonność do fałszywych detekcji obecności | - biura prywatne |
| pasywne czujniki dźwięków słyszalnych | - niska nachalność | - skłonność do fałszywych detekcji obecności | - jako metoda wspomagająca |
| identyfikatory RFID (<i>radio frequency identification</i>) lub Bluetooth | - informacja o lokalizacji osób - identyfikacja użytkownika | - wzbudzają obawy dotyczące prywatności - konieczność nieustannego noszenia identyfikatorów przy sobie | - poszczególne stanowiska pracy w biurach |
| systemy biometryczne | - identyfikacja użytkownika | - wzbudzają obawy dotyczące prywatności | - poszczególne stanowiska pracy w biurach |
| czujniki nacisku | - mogą monitorować określone miejsce w przestrzeni (np. krzesło) - informacja o lokalizacji osób | - wysoka nachalność - wzbudzają obawy dotyczące prywatności | - poszczególne stanowiska pracy w biurach |
| bariery świetlne | - brak nachalności | - zafałszowane informacje w przypadku gdy kilka osób przechodzi jednocześnie przez wiązkę świetlną | - poszczególne stanowiska pracy w biurach |
| analiza obrazów z kamer | - informacja o lokalizacji osób - identyfikacja użytkownika | - wzbudzają obawy dotyczące prywatności - bardzo wymagające przetwarzanie danych | - poszczególne stanowiska pracy w biurach |
| używanie komputera, interfejsu komunikacji, urządzeń biurowych, zmiana nastaw systemów sterowania | - brak nachalności | - brak wykrywania osób nieużywających urządzeń / niezmiwiających nastaw systemów | - jako metoda wspomagająca - poszczególne stanowiska pracy w biurach |
| śledzenie urządzeń przenośnych (np. telefonów komórkowych) | - informacja o lokalizacji osób | - wzbudzają obawy dotyczące prywatności - konieczność noszenia urządzeń przy sobie - zakłada się, że wszystkie osoby mają dane urządzenie | - poszczególne stanowiska pracy w biurach |

W tabeli 6 zaprezentowano wyniki badań dotyczące oszczędności energii na oświetlenie w biurach, uzyskanych z wykorzystaniem systemów automatycznego sterowania z wykrywaniem zajętości pomieszczenia.

Tabela 6. Oszczędności energii na oświetlenie w biurach, uzyskiwane dzięki systemom automatycznego sterowania z wykrywaniem zajętości pomieszczenia.

| metoda badania: S – symulacja komputerowa, E – eksperyment, M – metaanaliza | oszczędności energii [%] | czas opóźnienia wyłączenia oświetlenia TD [min] | warunki badania, uwagi; B – odniesienie dla kalkulacji oszczędności energii | źródło |
|--|--------------------------|---|--|--------|
| E | -63,7 – 34,3 | | sterowanie strefowe; -63,7% (wzrost zużycia energii) dla wykrywania obecności, 34,3% dla wykrywania absencji | [83] |
| S | -30 – 20 | | -30% (wzrost zużycia energii) dla wykrywania obecności, 20% dla wykrywania absencji | [282] |
| E | 3 – 84 | 2 – 20 | B: lampy załączone w godzinach pracy | [299] |
| S | 7 – 35 | | biuro typu <i>open space</i> , sterowanie lokalne – na poziomie poszczególnych stanowisk według zasady: zajęte stanowisko – 500 lx, pozostały obszar – 300 lx; 35% dla 1/12 stanowisk zajętych, 7% dla wszystkich stanowisk zajętych, B: wszystkie lampy ściemnione dla wytworzenia 500 lx na obszarze zadania | [279] |
| E | 10 – 19 | 7 – 15 | B: zużycie energii przed doposażeniem instalacji w czujniki obecności; oszczędności są o około 25% wyższe jeżeli uwzględni się oddziaływanie na system HVAC | [290] |
| E | 19,4 – 23,4 | | 19,4% dla lamp fluorescencyjnych, 23,4% dla lamp LED; B: oświetlenie załączane i wyłączane ręcznie podczas godzin pracy | [126] |
| E | 20 – 25 | 5 / zmienny | 20% dla TD=5 min, 25% dla TD zmiennego; B: lampy załączone w godzinach pracy (9:00–18:30) | [267] |
| E | 20 – 26 | 15 – 20 | B: oświetlenie sterowane ręcznie | [281] |
| E | 20 – 28 | 2 – 5 | biuro typu <i>open space</i> , sterowanie lokalne – na poziomie poszczególnych stanowisk; czujnik PIR nad stanowiskiem oraz czujnika nacisku w krześle; 20% dla TD=2 min, 28% dla TD=5 min; B: oświetlenie sterowane ręcznie | [292] |
| M | 22 | | przeciętne oszczędności energii na podstawie 23 publikacji zawierających wyniki uzyskane eksperymentalnie | [284] |

| | | | | |
|---|-------------|--------------------------|--|------------|
| E | 23,9 – 57,3 | | B: okres czasu kiedy słońce znajdowało się wyżej niż 4° nad horyzontem | [75] |
| S | 25 – 30 | 15 | biuro typu <i>open space</i> , sterowanie lokalne – na poziomie poszczególnych stanowisk; w przypadku nieobecności użytkownika lampy są ściemniane do nastawy 20% - nie są całkowicie wyłączone; B: oświetlenie sterowane ręcznie | [268] |
| E | 26,1 – 33,3 | 5 – 20 | B: lampy załączone w godzinach pracy (14h/dobę) | [300] |
| E | 28 – 38 | 5 – 20 | 37 biur prywatnych; 28% dla TD=20 min, 31% dla TD=15 min, 34% dla TD=10 min, 38% dla TD=5 min; B: oświetlenie sterowane ręcznie | [301, 302] |
| E | 29 – 38 | 15 | 86 boksów biurowych monitorowanych przez 1 rok; sterowanie lokalne – na poziomie poszczególnych boksów, TD=15 min w tym kilka minut w stanie zredukowanego naświetlania; B: lampy załączone w godzinach pracy | [254] |
| E | 35 – 75 | zmienny | B: lampy załączone w godzinach pracy (9h/dobę) | [190] |
| E | 40 | 30 (w tym 10 ściemnione) | 86 boksów biurowych; sterowanie lokalne – na poziomie poszczególnych boksów; B: oświetlenie sterowane ręcznie na poziomie całego pomieszczenia | [303] |
| E | 43 | 30 | 81 biur prywatnych, bez okien; B: lampy załączone w godzinach pracy (10h/dobę) | [256] |
| E | 66 – 94 | 10 | 66% dla wykrywania obecności, 94% dla wykrywania absencji; oszczędności odpowiadają systemowi, w którym urządzenia pomocnicze są „twardo” wyłączane (poza czujnikami ruchu), przy przejściu w stan czuwania oszczędności są do 14% niższe; B: lampy załączone w godzinach pracy (8:00–17:00) | [195] |

Obserwuje się, że instalacje wyręczające użytkownika poprzez automatyczne załączanie oświetlenia, w wyniku fałszywych detekcji często niepotrzebnie włączają lampy, co może prowadzić nawet do wzrostu zużycia energii w porównaniu do niezautomatyzowanej instalacji (patrz tabela 6). Skuteczniejszym rozwiązaniem jest metoda sterowania uzależniona od nieobecności użytkownika – wymagająca ręcznego załączania oświetlenia [83, 125, 48, 31].

Z kolei minimalizacja liczby nieuzasadnionych wyłączeń oświetlenia jest konieczna z punktu widzenia satysfakcji użytkowników i ich akceptacji dla systemu automatycznego sterowania. Zagadnienie, to stanowi kluczowe wyzwanie w projektowaniu przyjaznych użytkownikowi systemów wykorzystujących wykrywanie zajętości pomieszczenia [86]. Poza doborem czasu opóźnienia wyłączenia,

o prawidłowym działaniu systemu decyduje przyjęta metoda wykrywania zajętości pomieszczenia oraz sposób organizacji i rozmieszczenia czujników [86].

Instalacje, w których automatyczne wyłączenie oświetlenia w pomieszczeniu poprzedzone jest wstępnym ściemnianiem lamp w jego nieużytkowanych strefach, pochłaniają więcej energii niż te, w których lampy zostają całkowicie wyłączone w opuszczonych strefach. Jednakże w pomieszczeniach takich jak biura o dużych otwartych przestrzeniach użytkownicy podnoszą zarzut braku komfortu, gdy światło zostaje całkowicie wyłączone w innych, nieużytkowanych obszarach pomieszczenia [56, 31].

Schematy obecności użytkowników¹⁵ silnie wpływają na możliwe do uzyskania oszczędności energii przy zastosowaniu lokalnego sterowania oświetleniem. Niska liczba obecnych pracowników oraz silne zróżnicowanie czasowe oraz przestrzenne ich obecności prowadzi do wzrostu osiągnięć systemu sterowania, natomiast liczna grupa obecnych pracowników prowadzi do spadku możliwych oszczędności [303].

Automatyczne sterowanie oświetleniem z uwzględnieniem czynnika światła dziennego

Naturalne światło dzienne jest bardzo ważne dla dobrego samopoczucia i zdrowia człowieka. Charakteryzuje się doskonałym oddawaniem barw (CRI = 100), a stanowiąc niemigoczące dynamiczne źródło cechuje się korzystną dla człowieka zmiennością poziomu, kierunku oraz składu widmowego w ciągu dnia, zapewniając zmienne modelowanie i luminancyjne struktury, postrzegane jako korzystne dla ludzi we wnętrzowych środowiskach pracy [7, 20, 146, 20, 57]. Jego obecność tworzy atrakcyjne i przyjemne otoczenie świetlne [146], a także podnosi komfort wzrokowy i wydajność pracy ludzi [83].

Sama obecność światła dziennego nie ma wpływu na zapotrzebowanie energii na cele oświetleniowe. Zapotrzebowanie to można zmniejszyć wyłączając lub ściemniając lampy, gdy ilość światła naturalnego jest wystarczająca [146, 304, 160]. Dlatego też, system automatycznego sterowania oświetleniem z uwzględnieniem czynnika światła dziennego (*daylight-linked lighting control, photosensor-controlled lighting, daylight harvesting control*) uzupełnia jego niedobory światłem sztucznym, w celu zapewnienia odpowiedniego rozkładu natężenia oświetlenia i jego równomierności w obszarze zadania oraz jego otoczeniu [7, 83, 305, 166, 125, 274, 306, 284]. Ponieważ w wyniku tego typu sterowania, przy wystarczającej ilości światła dziennego lampy są ściemnione lub całkowicie wygaszone, użytkownicy opuszczając pomieszczenie zapominają o wyłączeniu oświetlenia. Dlatego, sterowanie w zależności od czynnika światła dziennego powinno stanowić uzupełnienie automatycznego sterowania oświetleniem w zależności od zajętości pomieszczenia, w celu zapewnienia dodatkowych korzyści energetycznych podczas obecności ludzi [282, 83].

¹⁵ Patrz: rozdz. 2.6, s. 50.

Ponieważ system działa stale podczas obecności użytkowników, ich pełna akceptacja dla sterowania i satysfakcja z tworzonych otoczenia świetlnego jest warunkiem koniecznym dla efektywnego współdziałania systemu oświetlenia elektrycznego ze światłem naturalnym [250].

Możliwe do uzyskania oszczędności energii są tym wyższe, im większa jest ilość dostępnego światła dziennego oraz głębokość penetracji pomieszczenia. Czynniki te zależą od [288, 307, 305, 308, 250, 87]:

- położenia geograficznego budynku,
- orientacji względem stron świata,
- zacielenia przez sąsiadujące obiekty,
- zastosowanych przesłon słonecznych,
- rozmiaru okien oraz przepuszczalności świetlnej szklenia,
- geometrii pomieszczenia oraz współczynników odbicia materiałów wnętrza,
- chwilowych warunków zewnętrznych (pora dnia i roku, warunki atmosferyczne).

Niezwykle istotna jest również barwa przeszkleń okiennych, które mogą stanowić filtr przepuszczający tylko pewien zakres długości fali światła słonecznego. Zbyt intensywna barwa przeszkleń (dobrana np. ze względów subiektywnych wrażeń estetycznych), może wręcz uniemożliwić korzystanie ze światła dziennego we wnętrzu ze względu na jego zabarwienie, powodując konieczność korzystania ze światła elektrycznego przez cały dzień.

Wyróżnia się także dwa typy systemów sterowania od światła dziennego, wykorzystujące [146, 166, 167, 86]:

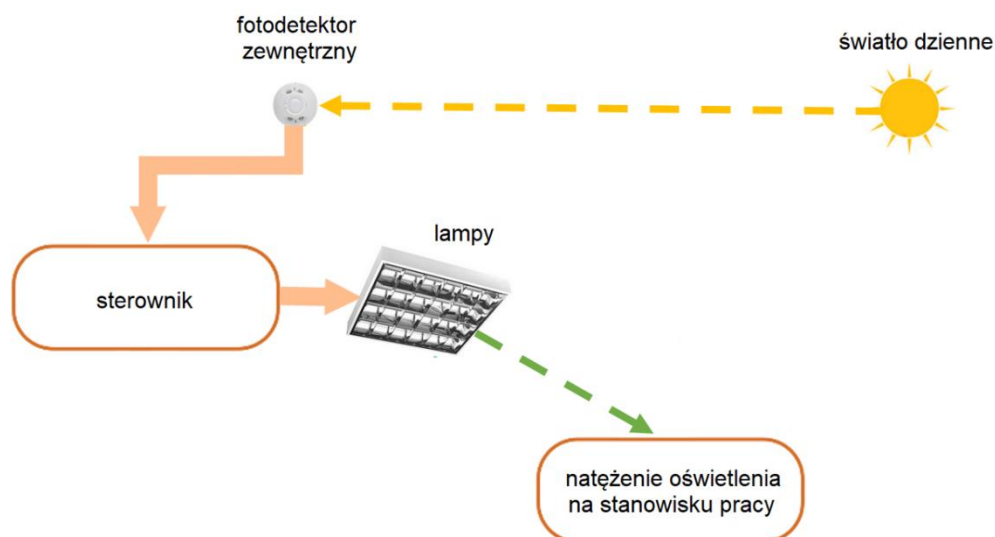
- płynne ściemnianie – płynna regulacja strumienia świetlnego lamp (*dimming, continous high frequency dimming*),
- kilkustopniowa regulacja strumienia świetlnego (*stepped*) lub sterowanie załącz/wyłącz (*on/off switching*).

W przypadku sterowania stopniowego, zasadniczym problemem są częste skokowe zmiany nastaw lamp podczas niestabilnego poziomu oświetlenia naturalnego, które mogą prowadzić do dyskomfortu u użytkowników [146].

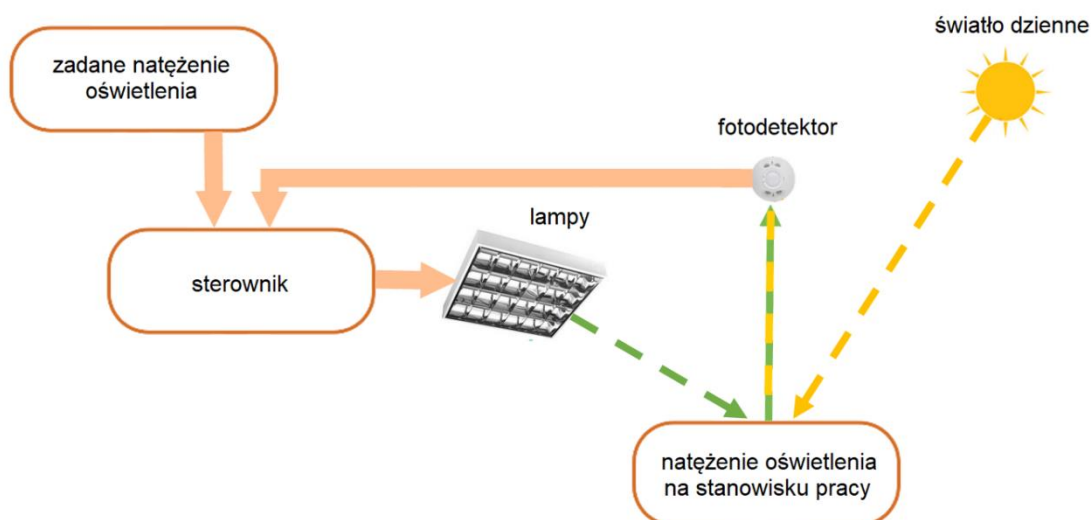
Sterowanie oświetleniem od światła dziennego może następować w układzie [168, 146, 170]:

- otwartym,
- zamkniętym.

W pierwszym przypadku, na podstawie informacji o ilości światła dziennego pochodzącej z czujnika natężenia oświetlenia (fotodetektora), regulator dobiera taki poziom ściemnienia lamp, aby przy znanej charakterystyce lamp i pomieszczenia, otrzymać na wyjściu pożądaną wartość sumarycznego natężenia oświetlenia w pomieszczeniu (patrz rysunek 10). Fotodetektor powinien być zamontowany poza strefą oddziaływania lamp – w pomieszczeniu przy oknie lub na zewnątrz budynku [146].



Rysunek 10. Schemat algorytmu sterowania oświetleniem w zależności od światła dziennego w układzie otwartym.



Rysunek 11. Schemat algorytmu sterowania oświetleniem w zależności od światła dziennego w układzie zamkniętym.

Z kolei w zamkniętym układzie sterowania (patrz rysunek 11), regulator (poprzez sprzężenie zwrotne) otrzymuje z fotodetektora informacje o bieżącym, łącznym natężeniu oświetlenia w zdefiniowanej strefie pomieszczenia, które wynika zarówno z oddziaływania oświetlenia elektrycznego jak i naturalnego. Informacja ta jest porównywana z zadaniem natężeniem oświetlenia i używana do korygowania nastaw lamp (poziomu ściemnienia lub ich załączenia / wyłączenia), w celu osiągnięcia i utrzymania pożądanego natężenia oświetlenia w pomieszczeniu [57, 146]. Ponieważ w tym układzie czujniki mają za zadanie ocenę lokalnych warunków oświetleniowych, w związku z tym powinny być umieszczone na biurkach w celu dostarczenia precyzyjnej informacji o natężeniu oświetlenia mieszanego [54]. Jednakże taka lokalizacja jest bardzo kłopotliwa z powodów trudności w doprowadzeniu przewodów, a także

możliwości przypadkowego lub celowego zasłonięcia przez użytkownika [309, 285]. W praktyce czujniki umieszcza się najczęściej na suficie i kalibruje według natężenia oświetlenia na biurku [255, 57]. Prowadzone są również badania z wykorzystaniem kamer cyfrowych zastępujących fotodetektory [180].

W przypadku gdy światło dzienne jest niedostępne, zamknięty układ sterowania zasadniczo realizuje funkcję automatycznej regulacji instytucjonalnej – natężenie oświetlenia jest regulowane do zadanego poziomu, adekwatnego dla potrzeb przy aktualnym sposobie wykorzystywania pomieszczenia. Dzięki informacji zwrotnej z fotodetektora kompensowane jest także obniżanie się natężenia oświetlenia w pomieszczeniu, zachodzące na skutek eksploatacyjnej zmiany parametrów oświetlenia. Kompensacja ta jest skuteczna, do chwili osiągnięcia maksymalnej nastawy lamp [33].

W tabeli 7 zaprezentowano raportowane oszczędności energii na oświetlenie w biurach, uzyskane z wykorzystaniem systemów automatycznego sterowania z uwzględnieniem czynnika światła dziennego.

Tabela 7. Oszczędności energii na oświetlenie w biurach, uzyskiwane dzięki systemom automatycznego sterowania z uwzględnieniem czynnika światła dziennego.

| metoda badania S – symulacja komputerowa, E – eksperyment, M – metaanaliza | oszczędności energii [%] | warunki badania, uwagi; B – odniesienie dla kalkulacji oszczędności energii | źródło |
|---|--------------------------|--|--------|
| E | -4,4 – 12 | Korea; rolety wewnętrzne; płynne sterowanie; B: okres czasu kiedy słońce znajdowało się wyżej niż 4° nad horyzontem | [75] |
| E | 0 – 79 | biura w stanach Wisconsin i Minnesota (USA); sterowanie płynne/stopniowe; 0%–62% dla systemu przed optymalizacją, 14,2%–79% dla systemu po optymalizacji obejmującej m.in. poprawę ustawień czujników; uwzględniając oszczędności energii uzyskiwane z systemu HVAC dzięki obniżeniu zapotrzebowania na oświetlenie: 0%–67% dla systemu przed optymalizacją, 15,7%–100% dla systemu po optymalizacji | [310] |
| S | 1 – 59 | Toronto (Kanada); żaluzje; płynne sterowanie; B: oświetlenie załączane i wyłączane ręcznie | [282] |
| S | 3 – 88 | oszczędności są zależne od powierzchni i lokalizacji okien | [311] |
| E | 8,3 – 63,2 | Szanghaj (Chiny), sterowanie strefowe stopniowe; 8,3% przy braku automatycznego wyłączenia przy wystarczającym świetle dziennym, 63,2% przy braku automatycznego załączenia przy niewystarczającym świetle dziennym; B: wszystkie lampy załączone | [83] |
| E | 9 – 27 | San Francisco, Nowy Jork (USA); sterowanie płynne/stopniowe; lampy załączone w godzinach pracy (7:30–15:30) | [289] |

| | | | |
|---|-------------|--|-------|
| E | 11 – 20 | 86 boksów biurowych monitorowanych przez 1 rok; Burnaby (Kanada); płynne sterowanie lokalne – na poziomie poszczególnych boksów; B: lampy załączone w godzinach pracy | [254] |
| S | 16 – 23 | San Paulo (Brazylia); 16% dla sterowania wielostopniowego, 23% dla płynnego sterowania | [312] |
| E | 20 | płynne sterowanie | [313] |
| E | 20 – 60 | Nowy Jork (USA), pełnowymiarowa w pełni wyposażona makieta zewnętrzna; automatycznie sterowane żaluzje w celu ograniczenia ośnienia; płynne sterowanie; B: lampy załączone w godzinach pracy | [314] |
| E | 24,1 – 45 | przy sterowaniu stopniowym 24,1% dla lamp LED 28% dla lamp fluorescencyjnych, 45% dla płynnego sterowania lamp LED, B: oświetlenie załączane i wyłączane ręcznie w godzinach pracy | [126] |
| E | 27 | San Francisco (USA), płynne sterowanie, B: oświetlenie załączane i wyłączane ręcznie | [281] |
| M | 27 | przeciętne oszczędności energii na podstawie 18 publikacji zawierających wyniki uzyskane eksperymentalnie | [284] |
| S | 27,5 – 32,9 | płynne sterowanie, oszczędności zależą od przyjętej powierzchni okien; B: wszystkie lampy załączone; zaobserwowano wzrost zużycia gazu na cele grzewcze o 0,44–0,73% | [142] |
| E | 31 | Stambuł (Turcja), płynne sterowanie; B: wszystkie lampy załączone | [307] |
| E | 33 | Hong Kong (Chiny), płynne sterowanie, B: wszystkie lampy załączone | [181] |
| E | 38 | Ottawa (Kanada), płynne sterowanie; B: lampy załączone w godzinach pracy (7h/dobę) | [255] |
| S | 45 – 61 | Bruksela (Belgia), Sztokholm (Szwecja), Ateny (Grecja), płynne sterowanie | [305] |
| E | 50 – 60 | Ottawa (Kanada), sterowanie płynne/stopniowe przy braku przesłon zaciemniających; B: wszystkie lampy załączone (6:00–18:00); przy zastosowaniu różnych konfiguracji statycznych żaluzji oszczędności są mniejsze o 5–45% dla sterowania płynnego oraz o 5–80% dla sterowania stopniowego | [315] |
| S | 66,9 – 76 | Ateny (Grecja), oszczędności zależą od typu użytego układu zasilającego | [308] |
| S | 76 – 92 | Montreal (Kanada); płynne sterowanie; 76% dla pochmurnych dni, 92% dla słonecznych dni; B: lampy załączone w godzinach pracy | [316] |
| E | 77 | Gwangju (Korea Południowa); płynne sterowanie lokalne – na poziomie poszczególnych stanowisk pracy; B: wszystkie lampy ściemnione dla wytworzenia 500 lx na obszarze zadania | [317] |
| E | do 50 | Hong Kong (Chiny); płynne sterowanie; B: wszystkie lampy załączone | [182] |
| E | do 60 | Boulder (Colorado, USA); płynne sterowanie; B: lampy załączone w godzinach pracy (8:00–17:00) | [318] |
| S | do 70 | USA; przesłony zaciemniające; płynne sterowanie; oszczędności zależą od rozmiaru okna i orientacji; B: wszystkie lampy załączone (10h/dobę) | [178] |

| | | | |
|---|-------|---|-------|
| S | do 85 | Miami, Houston i Phoenix (USA); zastosowanie sterowania oświetleniem skutkowało 30% obniżeniem zużycia energii elektrycznej przez cały budynek; zaobserwowano także 15% oszczędności energii na cele chłodnicze | [146] |
|---|-------|---|-------|

Z powodu korzyści energetycznych, a także ze względu na dobrodziejstwa światła dziennego, powinno być ono w możliwie wysokim stopniu wykorzystywane w budynkach. Obecnie, wykorzystywanie sterowania oświetleniem w zależności od światła dziennego dotyczy praktycznie wyłącznie dostosowania natężenia oświetlenia. Od niedawna trwają także prace nad automatyczną regulacją temperatury barwowej źródeł światła (*color tuning*), której głównym celem jest pozytywne oddziaływanie na ludzi¹⁶. Ponadto, sterowanie takie może także prowadzić do oszczędności energii [86].

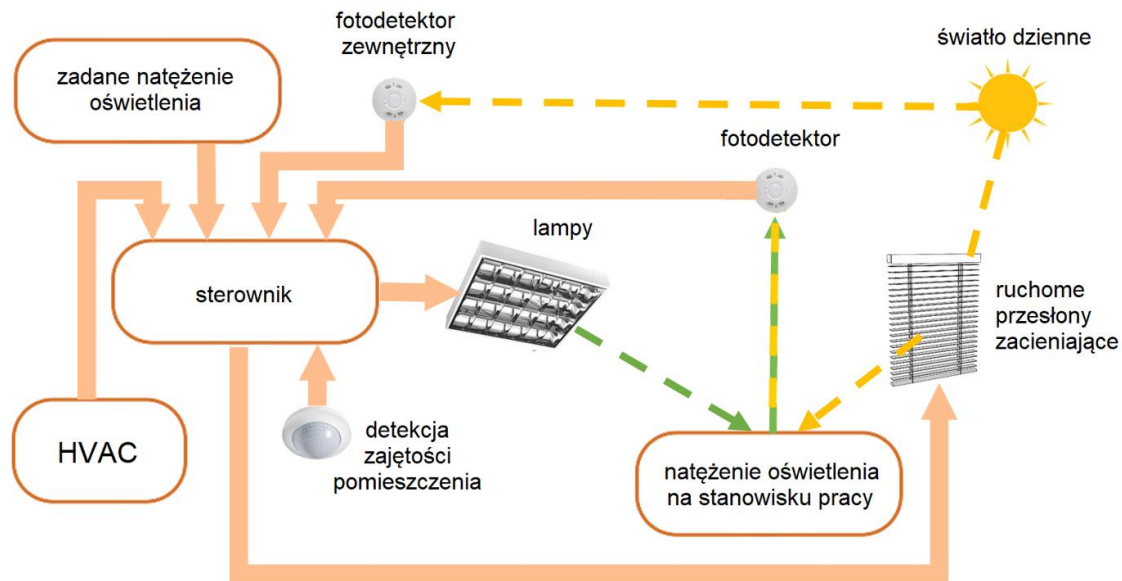
Ze sterowaniem oświetleniem z uwzględnieniem czynnika światła dziennego bezpośrednio związane jest także sterowanie ilością penetrującego do pomieszczenia światła dziennego, realizowane poprzez zastosowanie ruchomych przesłon zacinających (np. lamele żaluzji o zmiennym kącie nachylenia) [319, 320, 252, 321, 322, 323, 55, 264, 315, 324]. W kontekście oświetlenia, celem takiego działania jest stworzenie komfortowych warunków oświetlenia światłem dziennym, poprzez unikanie oślepiania (zjawiska olśnienia). Efekt ten osiąga się dzięki blokowaniu bezpośrednich promieni słonecznych. Zmiana pozycji przesłon oddziałuje także na warunki termiczne w pomieszczeniu. Stosowane obecnie sposoby pozycjonowania przesłon, można podzielić na (uszeregowane w kolejności od najłagodniejszego do najsilniejszego wpływu na poprawę efektywności energetycznej budynku) [33, 31]:

- ręczne,
- ręczne ze wspomaganie napędem elektrycznym,
- automatyczne,
- automatyczne, zintegrowane ze sterowaniem oświetleniem oraz systemem HVAC, z uwzględnieniem obecności lub absencji użytkowników w pomieszczeniu.

Najwyższe korzyści energetyczne dla budynku można uzyskać poprzez zintegrowane sterowanie systemami przesłon, oświetlenia oraz HVAC (patrz rysunek 12). W lecie, zmniejszenie dopływu światła naturalnego powoduje ograniczenie zysków ciepła od słońca, przez co pomieszczenia nie przegrzewają się, a w efekcie spada zapotrzebowanie na energię chłodniczą. W zimie natomiast, podniesienie przesłon umożliwia dogrzewanie pomieszczeń energią słońca. W przypadku obecności użytkowników, priorytetowe jest utrzymanie komfortu świetlnego, jakkolwiek przy pustym pomieszczeniu przesłony mogą być sterowane wyłącznie w celu poprawy warunków termicznych. Całkowite zamknięcie przesłon po zmierzchu umożliwia ograniczenie przenikania ciepła przez przeszklone powierzchnie, odbicie światła do

¹⁶ Patrz: rozdz. 3.1, s. 84.

wnętrza pomieszczenia, a także zwiększenie prywatności [66, 33, 325, 196, 80, 56, 183, 170, 326, 258].



Rysunek 12. Schemat algorytmu zintegrowanego sterowania oświetleniem i ruchomymi przesłonami zacinającymi w zależności od światła dziennego. Sterownik wykorzystuje także informacje o zajętości pomieszczenia oraz z systemu HVAC.

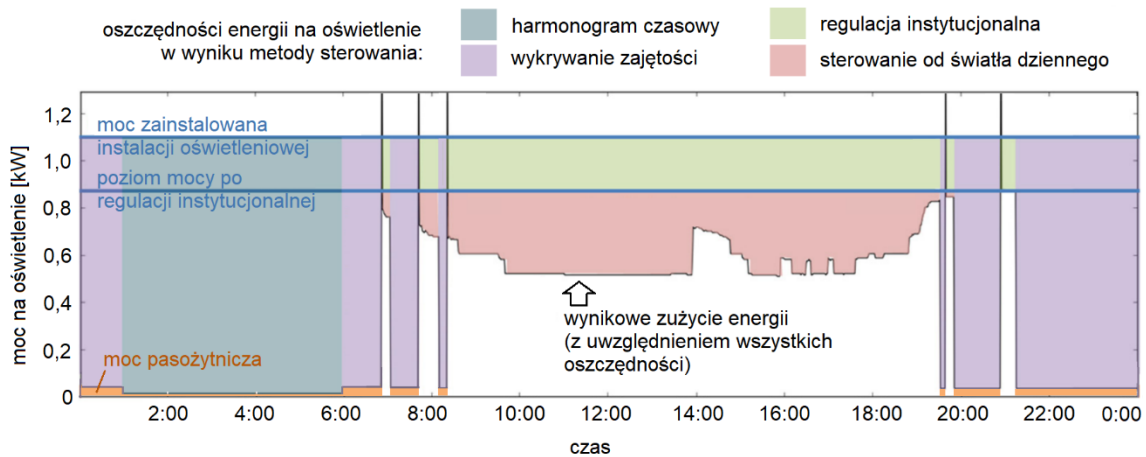
Automatyczne sterowanie oświetleniem – metody łączone

Jak pokazano w poprzedniej części rozdziału, obecnie stosuje się różne metody automatycznego sterowania oświetleniem, a każda z nich ma swoje unikalne cechy, które sprawiają, że w określonych warunkach niektóre metody przynoszą wyższe korzyści energetyczne niż inne. W sterowaniu oświetleniem wykorzystuje się także różne kombinacje omówionych do tej pory metod sterowania (w jednym systemie). Taka ich integracja umożliwia maksymalizację oszczędności energii bez narażania satysfakcji użytkownika [168].

Należy zwrócić uwagę, że integracja różnych metod sterowania oświetleniem, nie daje oszczędności energii równych sumie oszczędności wynikających z niezależnego wykorzystania metod składowych (patrz rysunek 13). Przykładowo, gdy światło zostało wyłączone z powodu nieobecności użytkowników, dodatkowe reagowanie na światło dzienne, nie zwiększy uzyskanych już oszczędności. Podobnie gdy oświetlenie jest ściemnione z powodu udziału światła dziennego, wyłączenie światła podczas nieobecności użytkowników nie spowoduje takich oszczędności jak w przypadku gdyby lampy pracowały pełną mocą [254].

W tabeli 8 zaprezentowano raportowane oszczędności energii na oświetlenie w biurach, uzyskane za pomocą współdziałania różnych metod sterowania w ramach jednego systemu. W przeciwieństwie do samej regulacji indywidualnej, jej współdziałanie z innymi metodami było również często analizowane w biurach typu

open space jak w innych typach przestrzeni. Jednakże w ich przypadku brakuje badań uwzględniających rzeczywiste preferencje użytkowników.



Rysunek 13. Przykładowy dobowy profil poboru energii przez instalację oświetleniową w biurze, po przeprowadzonej regulacji instytucjonalnej oraz zastosowaniu automatycznego sterowania oświetleniem w zależności od zajętości (wykrywanie oraz harmonogram czasowy) z uwzględnieniem czynnika światła dziennego, w odniesieniu do wyjściowego poboru energii – przypadku konwencjonalnej instalacji oświetleniowej pracującej przez całą dobę z mocą zainstalowaną. Rysunek na podstawie [327].

Tabela 8. Oszczędności energii na oświetlenie w biurach, uzyskane z wykorzystaniem kombinacji różnych metod automatycznego sterowania w jednym systemie.

| metoda badania: | kombinacja metod sterowania oświetleniem w jednym systemie: | oszczędności energii [%] | warunki badania, uwagi; B – odniesienie dla kalkulacji oszczędności energii; TD – czas opóźnienia wyłączenia oświetlenia | źródło |
|---|--|--------------------------|--|--------|
| S – symulacja komputerowa, E – eksperyment, M – metaanaliza | ZH – zajętość - harmonogram czasowy, ZW – zajętość - wykrywanie, D – uwzględnienie czynnika światła dziennego, R – regulacja instytucjonalna, I – regulacja indywidualna | | | |
| E | ZW + D | 11,5 – 57,4 | Szanghaj (Chiny); sterowanie stopniowe od światła dziennego; 11,5% dla wykrywania obecności, 57,4% dla wykrywania absencji; B: wszystkie lampy załączone | [83] |
| E | Z + D | 13,4 – 43 | płynne sterowanie od światła dziennego | [328] |
| E | D + I | 14 – 24 | 86 boksów biurowych monitorowanych przez 1 rok; Burnaby (Kanada); płynne sterowanie od światła dziennego; | [254] |
| | ZW + I | 39 – 40 | | |
| | ZW + D + I | 39 – 47 | | |

| | | | | |
|---|------------|-----------|---|-------|
| | ZW + D | 44 – 45 | sterowanie lokalne – na poziomie poszczególnych boksów, TD=15 min w tym kilka minut w stanie zredukowanego naświetlania; B: lampy załączone w godzinach pracy | |
| S | ZW + I | 16,6 | biuro typu <i>open space</i> , sterowanie lokalne – na poziomie poszczególnych stanowisk; Jinan (Chiny); założenie: wszyscy użytkownicy preferują takie samo natężenie oświetlenia; 16,6%, 44,3% oraz 34,3% dla nastawy 350lx (traktowanej przez autorów jako najbardziej komfortowa), 57% dla nastawy 300lx; B: lampy załączone w godzinach pracy (8:00–17:00) | [163] |
| | D + I | 34,3 – 57 | | |
| E | ZW + D + I | 44,3 | | |
| E | ZW + D | 17 – 32 | Turyn (Włochy); płynne sterowanie od światła dziennego; B: dla 17% wskaźnik LENI obliczony zgodnie z normą EN 15193/2007 dla sterowania ręcznego, 32% dla lamp załączonych w godzinach pracy (8:00–18:00) | [118] |
| E | ZW + D + R | 20 – 28 | Nowy Jork (USA); przesłony zaciemniające; płynne sterowanie od światła dziennego, regulacja instytucjonalna – nastawa 323lx (w niemal wszystkich pomieszczeniach); B: sterowanie według harmonogramów, odniesienie do ASHRAE Standard 90.1–2007 (20% oszczędności), the ASHRAE Standard 90.1–2001 (28% oszczędności) | [327] |
| E | ZW + D | 21,9 | płynne sterowanie od światła dziennego | [150] |
| S | ZW + I | 28 – 66 | biuro typu <i>open space</i> , sterowanie lokalne – na poziomie poszczególnych stanowisk; założenie: wszyscy użytkownicy preferują takie samo natężenie oświetlenia wynoszące 350 lx; 66% dla 2/12 stanowisk zajętych, 28% dla wszystkich stanowisk zajętych B: wszystkie lampy załączone | [285] |
| E | ZW + I | 29 | biura prywatne, San Francisco (USA); płynne sterowanie od światła dziennego; B: oświetlenie załączane i wyłączane ręcznie | [281] |
| | ZW + R | 43 | | |
| | ZW + D | 46 | | |
| E | ZW + D | 30 | Stambuł (Turcja); płynne sterowanie od światła dziennego, pomiary prowadzono jesienią i zimą – w lecie przewiduje się wyższe oszczędności; B: lampy załączone w godzinach pracy (9:00–16:00) | [152] |

| | | | | |
|---|-----------------|-------------|--|-------|
| E | ZW + I | 32 | 9 boksów biurowych monitorowanych przez 1 rok; USA; sterowanie lokalne – na poziomie poszczególnych boksów, TD=15 min; B: lampy załączone w godzinach pracy; oszczędności uzyskano pomimo podniesienia mocy zainstalowanej systemu o 50% | [253] |
| E | ZW + ZH + D + I | 35,5 | boksy biurowe; płynne sterowanie od światła dziennego | [329] |
| E | ZW + D | 36 – 59,9 | Korea; rolety wewnętrzne; płynne sterowanie od światła dziennego, B: okres czasu kiedy słońce znajdowało się wyżej niż 4° nad horyzontem | [75] |
| M | | 40 | przeciętne oszczędności energii na podstawie 24 publikacji zawierających wyniki uzyskane eksperymentalnie | [284] |
| E | ZH + D | 43 – 61 | San Francisco, płynne sterowanie od światła dziennego; B: oświetlenie sterowane ręcznie przez całą dobę | [330] |
| S | ZW + I | 45 – 65 | sterowanie lokalne – na poziomie poszczególnych stanowisk; stanowiska rozmieszczone wzdłuż ściany, 7/10 zajętych (45%), 4/10 zajętych (65%); B: wszystkie lampy załączone | [53] |
| S | ZW + D | 46 – 65 | Bruksela (Belgia), Sztokholm (Szwecja), Ateny (Grecja), płynne sterowanie od światła dziennego | [305] |
| E | ZW + I | 48 – 67,6 | sterowanie lokalne – na poziomie poszczególnych stanowisk; stanowiska rozmieszczone wzdłuż ściany, 7/10 zajętych (48%), 4/10 zajętych (67,6%); B: wszystkie lampy załączone | [331] |
| E | ZW + ZH + D + I | 48,5 – 68 | przy sterowaniu stopniowym od światła dziennego 48,5% dla lamp fluorescencyjnych oraz 56,1% dla lamp LED, 68% dla płynnego sterowania od światła dziennego lamp; B: oświetlenie załączane i wyłączane ręcznie podczas godzin pracy | [126] |
| E | ZW + D | 55 | płynne sterowanie od światła dziennego; B: lampy załączone przez 7 dni w tygodniu w godzinach pracy (8:00–20:00) | [149] |
| E | ZW + D + I | 60,8 – 65,2 | sterowanie lokalne – na poziomie poszczególnych stanowisk; płynne sterowanie od światła dziennego symulowanego; stanowiska rozmieszczone wzdłuż ściany, 7/10 zajętych; B: lampy załączone | [332] |
| E | ZW + ZH + D + I | 66,8 – 73,2 | biura prywatne i komórkowe; Zurych (Szwajcaria); B: lampy załączone w godzinach pracy (8h/dobę) | [111] |

| | | | | |
|---|--------|-------------|--|-------|
| E | ZW + I | 82,8 – 90,1 | biura prywatne; wykorzystanie infrastruktury WiFi dla wykrywania obecności użytkownika (82,8%) lub śledzenia lokalizacji użytkownika (90,1%); B: oświetlenie sterowane według harmonogramów | [28] |
| S | ZW + D | 95 | Lund (Szwecja), płynne sterowanie od światła dziennego; B: lampy załączone w godzinach pracy (8:00–17:00); urządzenia pomocnicze są „twardo” wyłączane (poza czujnikami ruchu), w przypadku systemu, którego urządzenia przechodzą w stan czuwania oszczędności są do 12% niższe | [195] |

Wpływ sterowania oświetleniem na poprawę efektywności energetycznej

W celu oceny wpływu metod sterowania oświetleniem na efektywność energetyczną oświetlenia w budynkach biurowych, przeprowadzono metaanalizę raportowanych oszczędności energii. W tabelach 3, 4, 6, 7, 8 zestawiono wyniki pochodzące wyłącznie z recenzowanych czasopism i materiałów konferencyjnych, a także norm branżowych lub raportów rządowych.

Przedstawione dane ukazują skalę oddziaływania systemów automatycznego sterowania na energooszczędność instalacji oświetleniowych. Uzyskiwane oszczędności wynikają tylko i wyłącznie z działania opisanych metod sterowania i są niezależne od innych sposobów poprawy efektywności energetycznej instalacji oświetleniowej. W zestawieniu pominięto te opracowania, w których oszczędności wynikały choćby częściowo z zastosowania innego typu źródeł światła.

Przytoczone wyniki pochodzące z różnych źródeł nie mogą być ze sobą bezpośrednio porównywane, ponieważ zostały uzyskane w wyniku różnych badań, które charakteryzowały się odmiennymi, specyficznymi warunkami. Różnice te dotyczą między innymi:

- charakterystyki i cech fizycznych rozważanych pomieszczeń,
- przedziału czasu, z którego pochodzą rozważane dane,
- odniesienia dla kalkulacji oszczędności energii – wariantu wyjściowego instalacji oświetleniowej (np. oświetlenie stale załączone w godzinach pracy lub sterowane ręcznie) oraz branego pod uwagę czasu pracy instalacji w ciągu doby,
- typu, parametrów, ustawienia i miejsca montażu czujników, rozmiaru stref sterowanych niezależnie, a także nastaw sterowników (np. czasu opóźnienia wyłączenia oświetlenia, zadanego natężenia oświetlenia przy sterowaniu od światła dziennego)
- zachowania użytkowników,
- dostępności światła dziennego.

Wykorzystywano także różne metody badań – oceny badaczy opierają się na symulacjach, eksperymentach w warunkach laboratoryjnych jak i monitorowaniu istniejących budynków. Przedstawione dane stanowią zatem ogólny obraz możliwych do uzyskania oszczędności przy wykorzystaniu różnych metod sterowania.

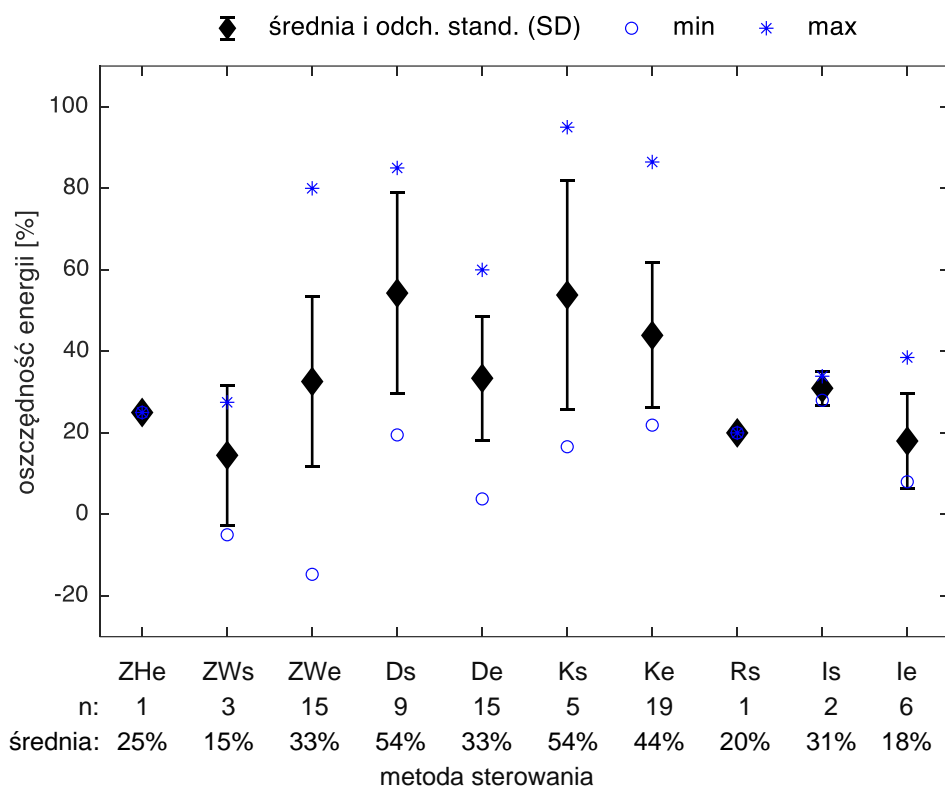
Większość opracowań podaje oszczędności energii w odniesieniu do działania systemu oświetlenia jedynie w godzinach pracy (zazwyczaj z pełną mocą lub określoną niższą nastawą), nie wspominając o zmianie zużycia energii pasożytnej występującej poza godzinami pracy biura. Aby systemy automatycznego sterowania oświetleniem mogły funkcjonować, część energii jest zużywana przez czujniki i urządzenia sterujące. W zależności od zastosowanych rozwiązań, dodatkowa energia potrzebna do zasilania czujników i urządzeń automatyki, gdy oświetlenie nie pracuje obniża raportowane oszczędności. Ocenia się, że w wysoce zautomatyzowanych instalacjach oświetleniowych urządzenia te odpowiadają za około 10–50% [333] lub 25–30% [86] zużycia energii. Tak znaczący udział jest spowodowany przede wszystkim długimi okresami pracy instalacji w trybie czuwania lub częściowego obciążenia. Dlatego projektując oświetlenie, należy zwrócić uwagę aby sama instalacja elektryczna zasilająca źródła światła była możliwie energooszczędna [333, 251, 195].

Przytoczone oszczędności energii dotyczą wyłącznie energii na oświetlenie. Oszczędności te oddziałują na bilans energetyczny budynku także w sposób pośredni. Ze względu na ograniczenie zysków ciepła związanych ze stratami w układach zasilania i źródłach światła, prowadzą do znaczącego [182] obniżenia zapotrzebowania energii na chłodzenie budynku oraz wzrostu zapotrzebowania na jego ogrzewanie [288, 146, 161, 142, 304, 154, 334]. To pośrednie oddziaływanie jest jednak trudne do ujęcia ilościowego, ze względu na złożone procesy cieplne w budynku, zależne od jego charakterystyki, sposobu użytkowania i warunków klimatycznych. Z tego względu niezwykle trudne jest oszacowanie całościowego wpływu poprawy efektywności energetycznej oświetlenia na efektywność energetyczną budynku. Dla nielicznych opracowań poruszających to zagadnienie, dane o wpływie na budynek przedstawiono w formie uwag w tabelach. Przyjmuje się, że największe korzyści wynikające z obniżenia zysków ciepła od oświetlenia osiągnąć są w budynkach położonych w ciepłym klimacie, gdzie ogromne nakłady energii są przeznaczone na chłodzenie [146, 288]. Z kolei w chłodnym klimacie, uzyskane oszczędności energii elektrycznej mogą być okupione wzrostem zapotrzebowania na energię cieplną do ogrzania budynku.

Na rysunku 14 pokazano porównanie wpływu poszczególnych metod sterowania na średnie uzyskiwane oszczędności energii na oświetlenie w biurach, z rozróżnieniem na wyniki będące efektem symulacji oraz w pozyskane sposób doświadczalny. Zgodnie z metodą zaproponowaną przez Williams, Atkinson, Garbesi, Page'a oraz Rubinsteina [284], dane o średnich oszczędnościach energii pochodziły bezpośrednio ze źródła literaturowego albo zostały obliczone na podstawie podanego minimum i maksimum. Następnie ogólną średnią oszczędność energii dla danej

metody obliczono jako średnią arytmetyczną średnich oszczędności pochodzących ze źródeł. Dane pochodzące z cytowanej w tabelach metaanalizy z roku 2012 [284] zostały pominięte w analizie.

W przypadku metody sterowania w oparciu o czynnik światła dziennego oraz kombinacji różnych metod można zaobserwować efekt charakterystyczny dla symulacji komputerowych – tj. wskazanie maksymalnych potencjalnych oszczędności, które są przeszacowane względem osiągniętych w badaniach doświadczalnych. Przyczyną tego zjawiska jest uproszczenie pewnych czynników występujących w środowiskach rzeczywistych (zachowanie ludzi, sposób wykonania i konfiguracji systemu) [86, 288, 284].



Rysunek 14. Średnie oszczędności energii na oświetlenie w biurach – porównanie metod sterowania: ZH – zajętość, harmonogram czasowy, ZW – zajętość, wykrywanie, D – uwzględnienie czynnika światła dziennego, K – kombinacja różnych metod, R – regulacja instytucjonalna, I – regulacja indywidualna; metoda badania: s – symulacja komputerowa, e – eksperyment; n – liczba przypadków.

W celu podsumowania skuteczności metod sterowania, wzięto pod uwagę jedynie prace doświadczalne. W pracach tych monitorowano przypadek testowy oraz odniesienia lub monitorowano przypadek testowy, a obliczano przypadek odniesienia. Na tej podstawie można stwierdzić, że metody sterowania oświetleniem w biurach charakteryzują się średnim potencjałem oszczędności energii na poziomie:

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

Wynika stąd, że zainstalowany i prawidłowo skonfigurowany system automatycznego sterowania oświetleniem, a także regulacja oświetlenia mogą znacząco obniżyć zużycie energii na cele oświetleniowe w budynku biurowym, bez szkody dla komfortu wzrokowego. Dzięki temu metody te pozytywnie wpływają na efektywność energetyczną instalacji oświetleniowej, a także redukują szczytowe zapotrzebowanie na moc czynną przez cały obiekt [180, 254, 281].

3. Identyfikacja parametrów otoczenia świetlnego mających wpływ na subiektywną ocenę jakości oświetlenia.

3.1. Obecne rekomendacje dotyczące oświetlenia biurowych stanowisk pracy

Obecnie standardy i praktyka projektowania oświetlenia opierają się na definicji funkcji wizualnej światła w życiu człowieka¹⁷ [22, 11]. Norma europejska PN-EN 12464-1:2012 Światło i oświetlenie - Oświetlenie miejsc pracy - Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach [7], określa kryteria jakie powinno spełniać projektowane oświetlenie. W Polsce, zgodnie z obowiązującymi przepisami z zakresu bezpieczeństwa i higieny pracy [335, 336], przestrzeganie jej zapisów jest obowiązkowe. W normie określono między innymi wymogi dotyczące natężenia oświetlenia i jego równomierności, olśnienia, oddawania barw, a także temperatury barwowej w zależności od funkcji użytkowej pomieszczenia oraz rodzaju i dokładności wykonywanych czynności wzrokowych.

Wypracowane standardy wywodzą się z czasów biur tradycyjnych, w których pracowano głównie z dokumentami papierowymi. Dlatego też dominującym parametrem w projektowaniu instalacji oświetleniowej jest poziome natężenie oświetlenia na obszarze zadania [20]. W tabeli 9 zebrano wytyczne zawarte we wspomnianej normie [7], w zakresie eksploatacyjnego natężenia oświetlenia oraz jego równomierności w pomieszczeniach biurowych w zależności od typu obszaru, wykonywanego zadania lub działalności. Uogólniając, wymagania te są tym wyższe, im trudniejsze są wykonywane czynności wzrokowe. Eksploatacyjne natężenie oświetlenia definiuje się jako najniższą wartość średniego natężenia oświetlenia dopuszczalną podczas eksploatacji, niezależnie od wieku lub stanu instalacji oświetleniowej [337]. Średnie natężenie oświetlenia można określić jako:

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad (1)$$

gdzie:

E – natężenie oświetlenia w i -tym punkcie,

n – przyjęta liczba punktów na rozpatrywanej powierzchni.

¹⁷ Patrz: rozdz. 1, s. 11.

Z kolei równomierność oświetlenia oblicza się jako [337]:

$$U_0 = \frac{E_{min}}{\bar{E}} \quad (2)$$

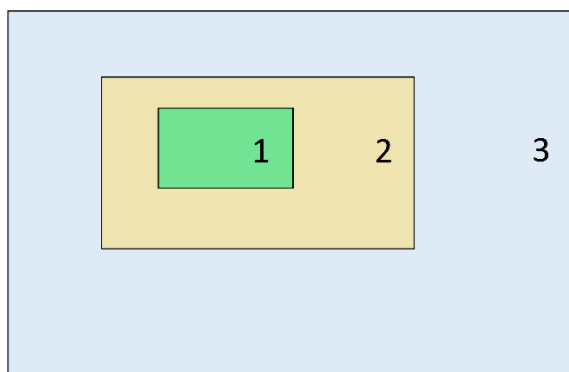
gdzie:

E_{min} – najmniejsza wartość natężenia oświetlenia w jednym z przyjętych punktów na rozpatrywanej powierzchni,

\bar{E} – średnie natężenie oświetlenia na rozpatrywanej powierzchni.

Tabela 9. Wymagania w zakresie eksploatacyjnego natężenia oświetlenia oraz równomierności oświetlenia dla biur w zależności od typu obszaru, zadania lub działalności [7].

| typ obszaru, zadanie lub działalność | natężenie oświetlenia | | | | | |
|---|-----------------------|------------|---------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|
| | obszar zadania | | obszar bezpośredniego otoczenia | | obszar tła | |
| | \bar{E}_{zad} [lx] | U_0 | \bar{E}_{bo} [lx] | U_0 | \bar{E}_{tla} [lx] | U_0 |
| archiwa | 200 | $\geq 0,4$ | 150 | $\geq 0,4$ | $\frac{1}{3} \times \bar{E}_{bo}$ | $\geq 0,1$ |
| miejsca recepcji | 300 | $\geq 0,6$ | 200 | | | |
| segregowanie, kopiowanie itp. | | $\geq 0,4$ | | | | |
| pisanie, pisanie na maszynie, czytanie, przetwarzanie danych (w tym praca DSE ¹⁸) | 500 | $\geq 0,6$ | 300 | | | |
| stanowiska pracy CAD (w tym praca DSE) | | | | | | |
| pokoje konferencyjne i pokoje spotkań | | | | | | |
| rysowanie techniczne | 750 | $\geq 0,7$ | 500 | | | |



Rysunek 15. Charakterystyczne obszary przestrzeni podczas wykonywania zadania wzrokowego: 1 – obszar zadania, 2 – obszar bezpośredniego otoczenia (pas o szerokości co najmniej 0,5 m otaczający obszar zadania, w obrębie pola widzenia), 3 – obszar tła (co najmniej 3 m szerokości, przylegający do obszaru bezpośredniego otoczenia, w obrębie granic przestrzeni).

Zalecenia dotyczące eksploatacyjnego natężenia oświetlenia oraz jego równomierności określono dla charakterystycznych obszarów przestrzeni podczas wykonywania

¹⁸ Praca z wykorzystaniem urządzeń wyposażonych w monitory ekranowe – DSE (display screen equipment).

zadania wzrokowego. Obszary te pokazano na rysunku 15. W praktyce, ich rozróżnienie następuje wielu problemów. Ze względu na wyposażenie biurowe i różne przedmioty znajdujące się w obszarze bezpośredniego otoczenia, może zachodzić trudność w wyodrębnieniu pasa o szerokości co najmniej 0,5 m. Z kolei pomiar poza stanowiskiem pracy może być nieuzasadniony merytorycznie lub niemożliwy, na przykład z powodu umieszczonych tam mebli. Ponadto, brak kryteriów wyznaczania zewnętrznych wymiarów obszaru bezpośredniego otoczenia, pozostawia swobodę w ich wyborze, która może skutkować spełnieniem lub nie spełnieniem wymagań normy [338].

W tabeli 10 przedstawiono wymagania określone w normie PN-EN 12464-1:2012 [7], w zakresie rozkładu luminancji i oświetlenia w przestrzeni biura. Rozkład luminancji w polu widzenia wpływa na poziom adaptacji oczu, co przekłada się na widzialność zadania. Aby zapewnić właściwy rozkład luminancji we wnętrzu, określono wymagane eksploatacyjne natężenie oświetlenia oraz jego równomierność na głównych powierzchniach pomieszczenia. Poza oświetleniem związanym z wykonywaniem zadania wzrokowego, powinno się także oświetlać obszar przestrzeni wnętrza, w którym przebywają ludzie. Oświetlenie to ma za zadanie ukazać obiekty i fakturę, a także poprawić wygląd osób w przestrzeni i ułatwić kontakt wzrokowy. Wytworzone przez nie warunki oświetleniowe opisywane są przez:

- średnie cylindryczne natężenia oświetlenia w przestrzeni działalności,
- modelowanie,
- oświetlenie kierunkowe zadań wzrokowych.

Określone w normie eksploatacyjne średnie cylindryczne natężenia oświetlenia, należy rozumieć jako średnie w pionowej płaszczyźnie natężenie oświetlenia oraz rozpatrywać na obszarach działalności i wnętrza, na płaszczyźnie poziomej i przy określonej wysokości od podłogi (np. 1,2 m dla osób siedzących i 1,6 m dla osób stojących). Modelowanie należy rozumieć, jako stan równowagi między oświetleniem rozproszonym i kierunkowym, a jego wskaźnik wyznacza się zgodnie z zależnością [7]:

$$W_{modelowania} = \frac{E_z}{E} \quad (3)$$

gdzie:

E_z – cylindryczne natężenie oświetlenia,

E – poziome natężenie oświetlenia w punkcie (zaleca się aby siatka punktów dla obu natężeń oświetlenia była zbieżna).

Przedstawione wymagania odnoszą się do oświetlenia sztucznego. W przypadku wykorzystywania światła naturalnego, związane z nim dodatkowe korzyści mogą kompensować brak równomierności oświetlenia na obszarach działalności i tła, a także brak dobrego modelowania [7].

Tabela 10. Wymagania dla biur w zakresie rozkładu luminancji i oświetlenia w przestrzeni wnętrza [7].

| natężenie oświetlenia na powierzchniach | | | | cylicydryczne natężenie oświetlenia | | wskaźnik modelowania |
|---|------------|------------------|------------|-------------------------------------|------------|--|
| ściany | | sufit | | \bar{E}_z [lx] | U_o | |
| \bar{E}_m [lx] | U_o | \bar{E}_m [lx] | U_o | | | $W_{modelowania}$ |
| >75 | $\geq 0,1$ | >50 | $\geq 0,1$ | ≥ 150 | $\geq 0,1$ | 0,3÷0,6 oznacza dobre modelowanie dla równomiernego rozmieszczenia opraw |

Poza wymaganiami związanymi z natężeniem oświetlenia, w biurach należy zapewnić oświetlenie charakteryzujące się naturalnym oddawaniem barw, które jest komfortowe oraz sprzyja wydolności wzrokowej i dobremu samopoczuciu. Oświetlenie elektryczne nie powinno także wywoływać zjawiska olśnienia, aby unikać błędów, zmęczenia, a także wypadków. Zalecenia te, wyrażone w postaci ujednoczonego wskaźnika olśnienia UGR (*Unified Glare Rating*) oraz współczynnika oddawania barw przedstawiono w tabeli 11.

Tabela 11. Wymagania w zakresie ujednoczonego wskaźnika olśnienia oraz oddawania barw dla biur w zależności od typu obszaru, zadania lub działalności [7].

| typ obszaru, zadanie lub działalność | UGR | Ra |
|--|-----------|-----------|
| archiwa | ≤ 25 | ≥ 80 |
| miejsca recepcji | ≤ 22 | |
| segregowanie, kopiowanie itp. | ≤ 19 | |
| pisanie, pisanie na maszynie, czytanie, przetwarzanie danych (w tym praca DSE) | | |
| stanowiska pracy CAD (w tym praca DSE) | | |
| pokoje konferencyjne i pokoje spotkań | | |
| rysowanie techniczne | ≤ 16 | |

W innych regionach świata rekomendacje bywają odmienne od tych, przyjętych w normie europejskiej, lecz pozostają zbliżone [339, 317, 340].

Ponieważ światło naturalne jest najbardziej korzystne dla człowieka, stanowi wzorzec do którego powinny dążyć instalacje oświetlenia sztucznego. Utrzymywanie poziomego natężenia oświetlenia zgodnie z normą jest wystarczające dla prawidłowego widzenia, jednak nie zapewnia odpowiednio silnej stymulacji fotoreceptorów odpowiedzialnych za synchronizację ludzkiego zegara biologicznego [11, 20]. Niedostateczna stymulacja oka światłem powoduje obniżenie zdolności koncentracji uwagi i sprawności pracy, pogorszenie samopoczucia oraz zwiększenie senności [20]. Uwzględnienie niewizualnych efektów biologicznych w projektowaniu instalacji oświetlenia sztucznego, wraz z pełnym wykorzystaniem światła dziennego może stymulować ludzi i poprawiać ich samopoczucie. W ostatnich latach rozważa się naśladowanie dynamiki światła dziennego przez automatyczne zmiany natężenia oświetlenia, rozkładu luminancji, kierunku i temperatury barwowej w sztucznym

oświetleniu pomieszczeń (tzw. „oświetlenie algorytmiczne”) [196, 18, 7, 21, 10, 9, 246, 341, 6, 20]. Dokładne wytyczne nie zostały jednak jeszcze sformułowane [7, 196, 342, 246]. Dotychczasowe badania wskazują, że ekspozycja na pionowe natężenia oświetlenia na poziomie oka (natężenie to ma kluczowe znaczenie dla pobudzenia receptorów niewizualnych) rzędu 1000 lx – kilku tysięcy lx podnosi wydajność pracy ludzi, obniża senność, poprawia nastrój, ułatwia koncentrację uwagi oraz skraca czas reakcji [6, 12, 343, 344, 20]. Dlatego, jedna z koncepcji zakłada dynamiczne podnoszenie intensywności oświetlenia w porze porannej oraz po przerwie obiadowej, a także jej sukcesywne podnoszenie po godzinie 15, które ma kompensować wzrost zmęczenia [20].

3.2. Indywidualne preferencje oświetleniowe ludzi

We wewnątrzowych środowiskach pracy prawidłowe oświetlenie sprzyja komfortowi, motywacji i produktywności pracowników, a także zwiększa ich satysfakcję z wykonywanej pracy. Ma również pozytywny wpływ na zdrowie i nastrój ludzi [345, 279, 13, 120]. Barwa światła oraz kolory powierzchni wnętrza i jego wyposażenia mogą wpływać na ocenę otoczenia świetlnego przez ludzi, jednakże uważa się, że natężenie oświetlenia stanowi najistotniejszy czynnik tej oceny [131].

Na stanowiskach pracy biurowej z monitorem ekranowym, rekomendowane natężenie oświetlenia na obszarze zadania wynosi 500 lx¹⁹. Jednak, kiedy oferuje się ludziom możliwość regulacji natężenia oświetlenia według własnych preferencji, poszczególne osoby wybierają zróżnicowane nastawy mieszczące się w szerokim zakresie (patrz tabela 12, rysunek 16). Na podstawie rysunku 16 można zaobserwować, że znacząca liczba osób preferuje natężenie oświetlenia niższe niż rekomendowane.

Inne badania wskazują także, że ludzie pracujący w większości z komputerem preferują niższe natężenia oświetlenia (100–300 lx), niż ludzie spędzający mniej czasu przy komputerze (300–600 lx) [77].

Zakres regulacji do 700 lx powinien umożliwić 90–99% pracowników biurowych osiągnięcie preferowanego natężenia oświetlenia. Standardy komfortu cieplnego mają na celu zaspokojenie potrzeb podobnego odsetka osób [339]. Niektórzy badacze zauważają również, że preferowane natężenia oświetlenia są zależne od dostępnego zakresu regulacji (maksymalnego dostępnego natężenia oświetlenia), a także od nastawy początkowej – im te wartości są niższe, tym niższe natężenie oświetlenia jest preferowane przez ludzi [81, 346, 70, 347, 348, 349]. Mimo, że wybierane nastawy różnią się, to satysfakcja i sprawność wzrokowa pozostają na zbliżonym poziomie [270].

Interesujące jest, że gdy natężenie oświetlenia na stanowisku osoby badanej, nie zostało ustawione przez nią, a przez kogoś innego, satysfakcja z warunków

¹⁹ Patrz: rozdz. 3.1, s. 82.

oświetleniowych jest niższa, pomimo że ustawiona wartość jest identyczna jak ta, którą wybrałaby osoba badana [347]. Wynika stąd, że aby wytwarzane warunki oświetleniowe były satysfakcjonujące, osoba musi mieć świadomość, że to ona sama decyduje o oświetleniu własnego stanowiska.

Po ustawieniu preferowanego natężenia oświetlenia, użytkownicy rzadko dokonują zmian. Niektórzy ludzie w ogóle nie zmieniają nastaw, a wśród osób które wprowadzają zmiany, większość koryguje jasność oświetlenia na początku dnia [350, 339, 50]. W zależności od aktywności poszczególnych osób, na danym stanowisku dokonywanych jest średnio od 0,02 do 1,52 zmian nastaw w ciągu dnia [253, 254, 71].

Tabela 12. Indywidualne preferencje ludzi w zakresie natężenia oświetlenia na stanowisku pracy biurowej.

| warunki eksperymentu: L – laboratoryjne R – rzeczywiste | typ biura: OS – biuro typu <i>open space</i> , B – boksy biurowe, K – biuro komórkowe, P – biuro prywatne | natężenie oświetlenia na biurku [lx] | mediana [lx] | średnia [lx] | odch. stand. [lx] | źródło |
|---|--|--------------------------------------|------------------|--------------|-------------------|--------|
| L | OS | 293 – 751 | | | | [348] |
| L | B | 83 – 725 ^a | 413 | 423 | 152 | [346] |
| L | B | 252 – 1176 | 375 | 458 | 201 | [339] |
| L | B | 33 – 944 ^b | 413 | 452 | 241 | [351] |
| | | 97 – 1081 ^b | 574 | 604 | 251 | |
| L | B | 160 – 797 | 503 | 501 | 171 | [352] |
| R | B | | 600 ^c | | | [253] |
| L | P | | 184 | 218 | 116 | [347] |
| | | | 391 | 385 | 89 | |
| | | | 194 | 250 | 168 | |
| | | | 491 | 488 | 133 | |
| L | K/P | 80 – 630 ^d | | | | [286] |
| | | 110 – 1230 ^d | | | | |
| R | K/P | 38 – 410 | | | | [79] |
| L | K/P | 230 – 1000* | | | | [353] |
| L | K/P | 1150 – 2950 ^{e, *} | | | | [81] |
| L | K/P | 90 – 1060* | | 551 | 227 | [255] |

a – osiągnięto maksymalne możliwe do ustawienia natężenie oświetlenia,

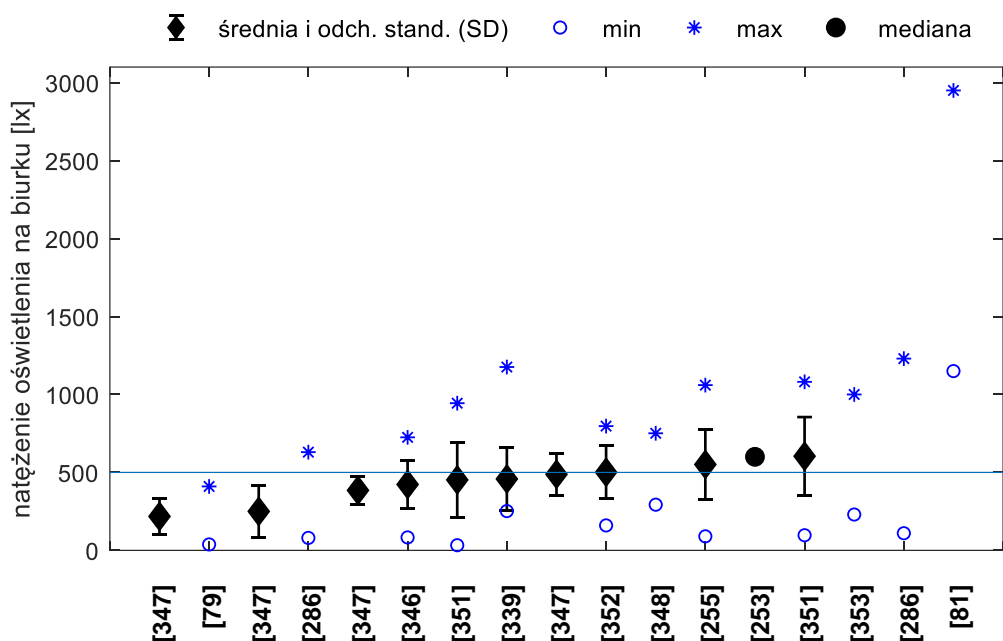
b – zakresy preferencji różniły się w zależności od układu i rodzaju zastosowanych opraw oświetleniowych,

c – w tym 7 osób poniżej zalecanych 500 lx i 10 osób powyżej 500 lx,

d – wybierane nastawy różniły się w zależności od dostępnego zakresu regulacji, niższy zakres skutkował niższymi wyborami,

e – w tym średnio 800 lx dodatkowego oświetlenia sztucznego, mimo obecności światła dziennego,

* – wynik uwzględnia oddziaływanie światła dziennego.



Rysunek 16. 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 [7] (pozioma linia na wykresie).

Ludzie są stosunkowo niewrażliwi na powolne zmiany natężenia oświetlenia [354], a ich zakres tolerancji przy dowolnym natężeniu oświetlenia wynosi około 50% [355]. Oznacza to, że dla większości osób dopiero około półtorakrotna zmiana natężenia oświetlenia wywołuje odczucie najmniejszej znaczącej zmiany w oświetleniu. Wartość tę przyjęto w normie europejskiej EN 12464-1. Według innych źródeł zakres ten jest niższy i wynosi 30% [356], bądź 20% [355].

3.3. Charakterystyka pomieszczenia doświadczalnego

W badaniach przedstawionych w kolejnych częściach pracy wykorzystywano dwa analogiczne pomieszczenia 3.02 i 4.02 o powierzchni ok. 102 m² każde, zlokalizowane odpowiednio na III i IV piętrze budynku Małopolskiego Laboratorium Budownictwa Energooszczędnego (MLBE) Politechniki Krakowskiej²⁰ (patrz rysunki 17 i 18). Pomieszczenia te charakteryzują się przeszkleniami o dużych powierzchniach (okna od sufitu do podłogi oraz przeszklone ściany działowe), a także zewnętrznymi przesłonami przeciwsłonecznymi (zacinającymi), które są elementami charakterystycznymi dla nowoczesnych budynków biurowych [321, 252].

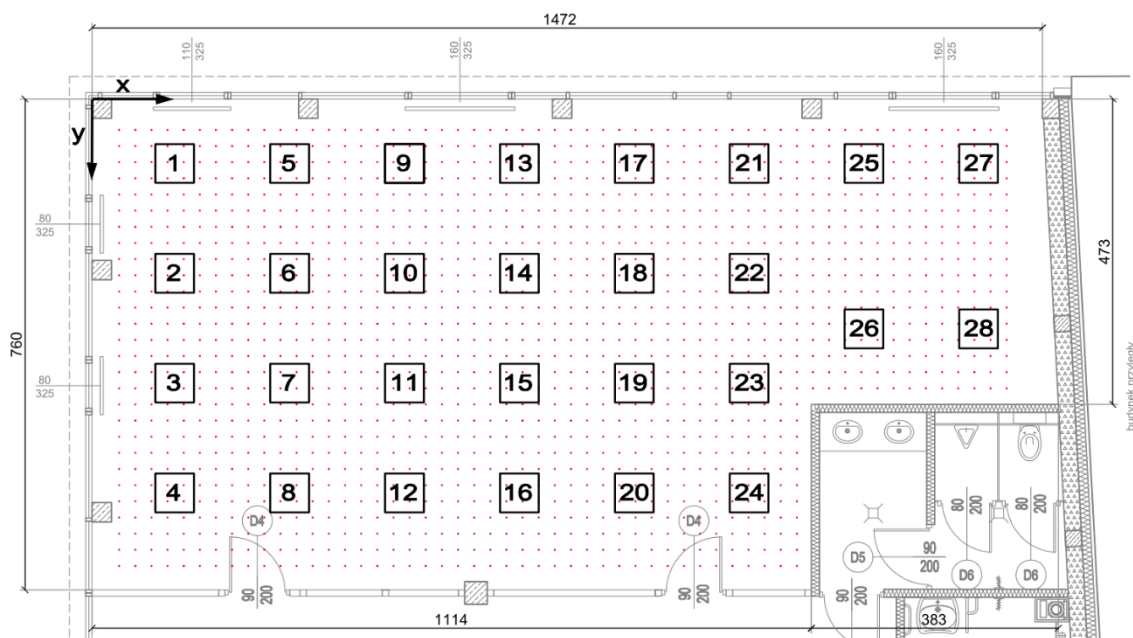
W każdym z pomieszczeń zamontowana jest instalacja oświetlenia ogólnego składająca się z 28 opraw zintegrowanych ze półprzewodnikowymi źródłami światła

²⁰ Małopolskie Laboratorium Budownictwa Energooszczędnego stanowi unikatowe laboratorium do badań technologii w obszarze szeroko rozumianego budownictwa energooszczędnego w skali naturalnej 1:1. Autorami pomysłu byli dr hab. inż. arch. prof. PK Marcin Furtak oraz dr inż. Małgorzata Fedorczyk-Cisak. Budynek wzniesiono w ramach projektu MRPO.05.01.00-12-089/12-00 w latach 2011 – 2014.

(LED), zapewniająca bezpośrednio²¹ oświetlenie obszaru zadania w pomieszczeniu. 24 lampy zostały równomiernie rozmieszczone w siatce 4 × 6, przy odstępach około 1,15 m oraz 1,05 m między nimi, odpowiednio dla pomieszczenia 3.02 i 4.02. Pozostałe 4 lampy oświetlają wysunięte części pomieszczeń.



Rysunek 17. Pomieszczenie doświadczalne 4.02 w budynku Małopolskiego Laboratorium Budownictwa Energooszczędnego; w tle widoczne okna (od podłogi do sufitu) zastłonięte zewnętrznymi żaluzjami.



Rysunek 18. Plan pomieszczenia doświadczalnego 4.02 wraz z rozmieszczeniem opraw oświetleniowych. Na rysunku widoczne jest także rozmieszczenie punktów pomiarowych natężenia oświetlenia według przyjętej siatki oświetleniowej²². Rysunek na podstawie [357].

Zastosowane oprawy oświetleniowe typu KTM2 600 firmy ES-SYSTEM osadzono w ramach metalowych, przymocowanych do stropu z wykorzystaniem zawiesi. Lampy są sterowane niezależnie, za pośrednictwem cyfrowego protokołu komunikacji DALI (*Digital Addressable Lighting Interface*). Wykorzystano sterownik Loytec L-DALI-3E101 (patrz rysunek 19). Sterowanie odbywa się w zakresie: 0% (lampa wyłączona) oraz

²¹ Światło z oprawy kierowane jest wyłączenie w półprzestrzeń dolną.

²² Punkty te są wykorzystywane w celu doboru modelu symulacyjnego pomieszczenia doświadczalnego opisanego w rozdz. 4.3, s. 110.

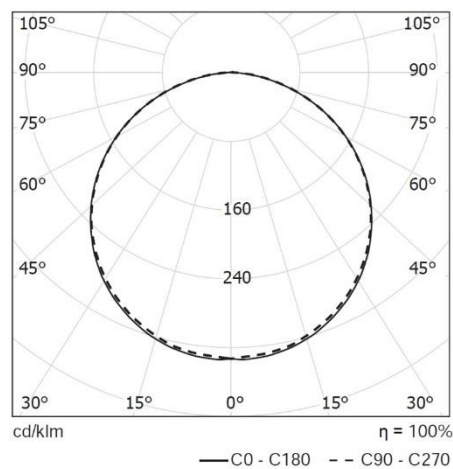
10% – 100% (maksymalny strumień świetlny) z krokiem 1%. Za zasilanie źródeł światła odpowiadają indywidualne zasilacze zabudowane wewnątrz opraw. Pozostałe parametry techniczne zastosowanych lamp [8]:

- współczynnik oddawania barw – CRI>80,
- temperatura barwowa – 4000 K,
- znamionowy strumień świetlny – 5000 lm,
- znamionowa moc oprawy – 51 W,
- znamionowe napięcie zasilania – 230 V AC,
- oprawa 597 × 597 mm dostropowa lub kładziona na ruszcie, obudowa z lakierowanej blachy stalowej,
- opalowy dyfuzor ze szkła akrylowego (PMMA),
- deklarowana trwałość eksploatacyjna modułu LED – 50000 godzin pracy,
- krzywe światłości oprawy (patrz rysunek 20).

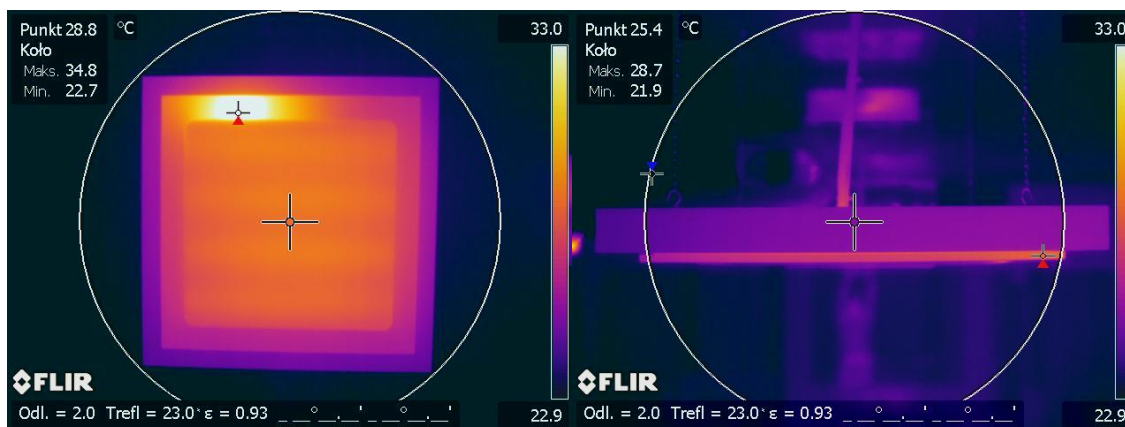
Obraz termograficzny opraw oświetleniowych pracujących w ustalonym stanie termicznym przedstawiono na rysunku 21.



Rysunek 19. Sterownik Loytec L-DALI-3E101 wraz z zasilaczem magistrali DALI zamontowane w pomieszczeniu doświadczalnym.



Rysunek 20. Krzywe światłości zastosowanej oprawy KTM 2 600 firmy ES-SYSTEM



Rysunek 21. Obrazy termograficzne pracujących opraw oprawy KTM 2 600 firmy ES-SYSTEM, widok z dołu (po lewej), widok z boku (po prawej). Na zdjęciu po lewej widoczny jest obszar podwyższonej temperatury, który wynika ze strat występujących w zasilaczu.

Badane pomieszczenia posiadają przeszklone około 62% całkowitej powierzchni ścian, w tym około 88% powierzchni ścian zewnętrznych, zamykających pomieszczenie od strony wschodniej i południowej. Przeszklenia otworów w ścianach zewnętrznych stanowią okna trzyszybowe (typu od sufitu do podłogi), natomiast przeszklenia wewnętrzne wykonane są jako jednoszybowe. Wnętrze jest chronione przed nadmiernym wnikaniem promieni słonecznych przez zewnętrzne poziome przesłony o regulowanym kącie nachylenia.

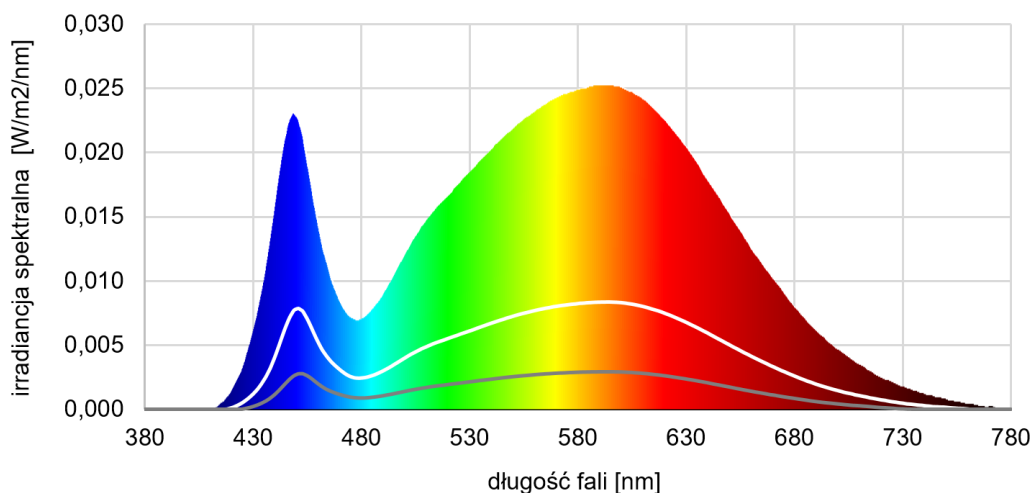
3.4. Pomiar parametrów charakteryzujących jakość oświetlenia w pomieszczeniu doświadczalnym

W celu scharakteryzowania warunków oświetleniowych wytwarzanych w pomieszczeniu doświadczalnym, przeprowadzono pomiar wybranych parametrów charakteryzujących jakość oświetlenia [341, 5]:

- rozkład widmowy mocy promienistej,
- wskaźnik oddawania barw Ra (CRI – *color rendering index*),
- temperatura barwowa,
- współrzędne chromatyczne,
- migotanie światła.

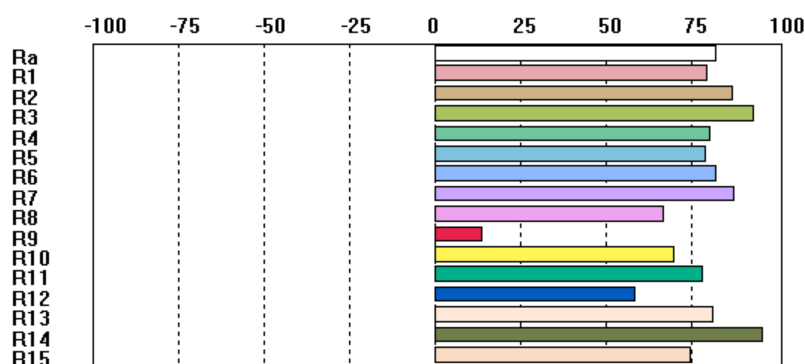
Dane rejestrowano za pomocą spektrometri Everfine SFIM-300, w ustalonym stanie pracy lamp. Właściwości metrologiczne urządzenia określono w jego instrukcji [358].

Zarejestrowane widmo (patrz rysunek 22), jest charakterystyczne dla półprzewodnikowych źródeł światła [246]. Najwyższa gęstość strumienia promieniowania osiągana jest dla fal o długości około 595 nm. W zakresie światła niebieskiego widoczne jest charakterystyczny pik z maksimum przypadającym dla fal o długości 451 nm.



Rysunek 22. Rozkład widmowy mocy promienistej źródeł światła w pomieszczeniu doświadczalnym dla 3 nastaw lamp: maksymalnej (100%) – przebieg barwny, 32% – linia biała, minimalnej (10%) – linia szara. Nastawy te korespondują z natężeniami oświetlenia odpowiednio 1500 lx, 500 lx oraz 175 lx osiąganymi na obszarze zadania w centralnej części pomieszczenia.

Ogólny wskaźnik oddawania barw R_a wyniósł 82,5. Wartości szczegółowych wskaźników oddawania barw, tj. próbek 1–8 na podstawie których wyliczono wskaźnik ogólny oraz próbek dodatkowych 9–14 przedstawiono na rysunku 23. Szczególne niski poziom zarejestrowano dla wskaźnika cząstkowego dla próbki czerwonej ($R_9=14$). Wskaźnik R_a jest powszechnie stosowaną miarą opisywania jakości emitowanego światła białego. Jednakże, należy podkreślić, że wskaźnik ten nie charakteryzuje w pełni jakości światła źródeł LED, których widmo jest dobierane dla dobrego oddawania barw próbek testowych [5, 359, 360, 361].

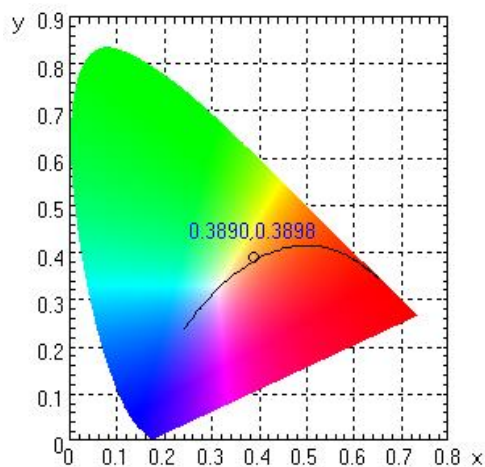


Rysunek 23. Wartości szczegółowych wskaźników oddawania barw R_a lamp w pomieszczeniu doświadczalnym przy nastawie lamp 32% ($\bar{E} \approx 500$ lx).

Emitowane światło charakteryzuje się temperaturą barwową najbliższą²³ 4000 K i spełnia kryterium odchylenia od punktu chromatyczności odniesienia według

²³ Temperatura barwowa najbliższa (CCT – *correlated color temperature*) jest to taka temperatura ciała doskonale czarnego (promiennika Plancka), której barwa postrzegana przez człowieka jest najbardziej zbliżona do barwy światła emitowanego przez rozpatrywane źródło [360, 361].

normy ANSI C78.377-2011 [362]. Współrzędne chromatyczne przedstawiono na rysunku 24.



Rysunek 24. Współrzędne chromatyczne źródeł światła (czarny okrąg) w przestrzeni barw CIE1931, względem krzywej promieniowania ciała doskonale czarnego (czarna linia).

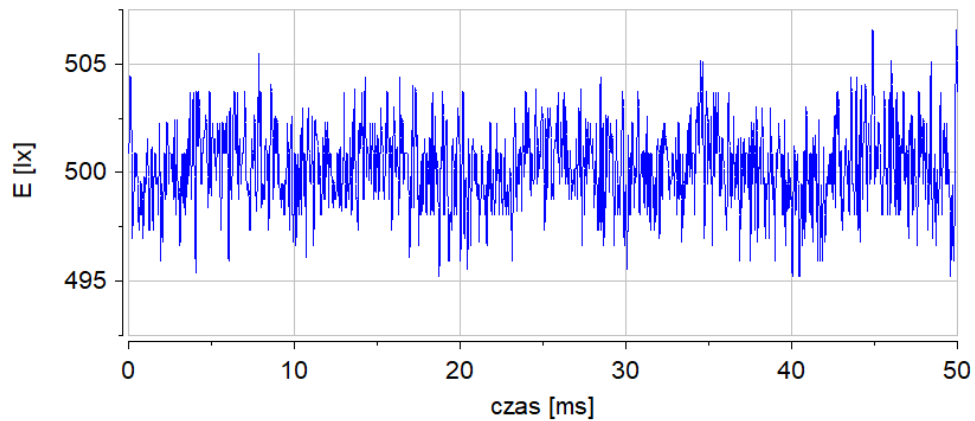
Badane lampy charakteryzują się wysoką stabilnością emisji strumienia świetlnego, w pełnym zakresie ściemniania. W tabeli 13 przedstawiono zarejestrowane dla wybranych nastaw lamp: średnie natężenie oświetlenia w punkcie pomiarowym, zmienność chwilowego natężenia oświetlenia oraz obliczony na tej podstawie względny wskaźnik migotania światła²⁴ (*percent flicker*) i wskaźnik migotania światła²⁵ (*flicker index*). Przebieg zmienności chwilowego natężenia oświetlenia przy nastawie lamp 32% pokazano na rysunku 25.

Tabela 13. Parametry charakteryzujące migotanie źródeł światła przy wybranych nastawach.

| nastawa lamp | E_{sr} [lx] | E_{max} [lx] | E_{min} [lx] | względny wskaźnik migotania światła (<i>percent flicker</i>) [%] | wskaźnik migotania światła (<i>flicker index</i>) [%] |
|--------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|--|---|
| 100% | 1505 | 1511 | 1498 | 0,44 | 0,06 |
| 32% | 500,3 | 506,6 | 495,5 | 1,13 | 0,15 |
| 10% | 174,5 | 177,3 | 171,4 | 1,68 | 0,23 |

²⁴ Względny wskaźnik migotania światła (*percent flicker*) – względna miara cyklicznej zmiany mocy wyjściowej źródła światła (modulacja procentowa) [389].

²⁵ Wskaźnik migotania światła (*flicker index*) – miara cyklicznej zmienności mocy źródła światła, z uwzględnieniem kształtu fali strumienia świetlnego [389].



Rysunek 25. Przebieg zmienności chwilowego natężenia oświetlenia przy nastawie lamp 32% ($E \approx 500$ lx na obszarze zadania w centralnej części pomieszczenia).

3.5. Subiektywna ocena oświetlenia w pomieszczeniu doświadczalnym

Przeprowadzono własne badanie ankietowe, którego celem była odpowiedź na pytanie jak ludzie oceniają warunki oświetleniowe w nowoczesnych biurach wytworzone zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie PN-EN 12464-1:2012 [7]. Poszukiwano także potwierdzenia czy wniosek, że znacząca liczba osób preferuje wartości niższe niż rekomendowane 500 lx²⁶ pozostaje nadal zasadny. Potrzeba przeprowadzenia badań własnych wynikała z faktu, że prace opisywane w literaturze prowadzone były wiele lat temu w środowiskach biurowych wyposażonych w lampy fluorescencyjne i stanowiska pracy z monitorami CRT. Nowoczesne biura oświetlane są lampami LED, stanowiska są wyposażone w monitory LCD lub LED, a większość pracy odbywa się przy komputerze.

Istotne ograniczenie stosowanej metody, polega na tym, że uczestnicy badania mogą odpowiadać tak, jak myślą, że się od nich oczekuje [72]. 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.

Na potrzeby badania autor opracował kwestionariusz komputerowy (patrz załącznik A). W części dotyczącej warunków oświetleniowych bazuje on na dotychczas spotykanych w literaturze – rozszerzonej ankiecie OLS (*Office Lighting Survey*) [363] oraz polskich ankietach dotyczących oceny warunków pracy wzrokowej ludzi [364, 365], został jednak uzupełniony i zaadoptowany do specyfiki przeprowadzanego doświadczenia. W efekcie uzyskano elektroniczny kwestionariusz wyświetlany na monitorach uczestników w trakcie badania, składający się z maksymalnie 36 pytań przy czym, ich ostateczna liczba zależała od wcześniej udzielonych odpowiedzi. Część pytań, których celem było ukazanie opinii respondentów na temat wybranych parametrów

²⁶ Patrz: rozdz. 3.2, s. 85.

stanowiska lub jego oświetlenia oparto o pięciostopniową hybrydę skal Likerta i semantycznej. Skale te są najpopularniejszymi stosowanymi w badaniach oświetlenia, a ich zalety i wady zostały szeroko opisane w literaturze [278]. Część pytań dotyczyła także poza oświetleniowych aspektów ergonomii stanowiska pracy – zagadnienia te nie będą omawiane w niniejszej pracy.

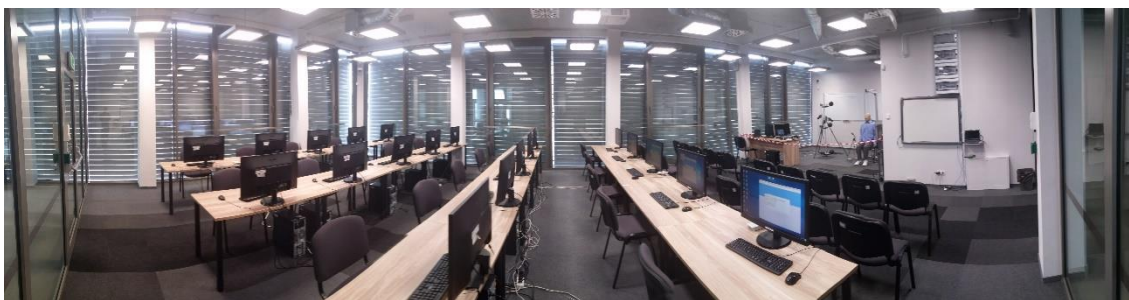
Przygotowanie pomieszczenia doświadczalnego

Badanie przeprowadzone zostało w kontrolowanym środowisku (IV 2018 r. – VI 2019 r.), w pomieszczeniu doświadczalnym 3.02²⁷. Pomieszczenie umeblowano dwudziestoma ławkami (1,2 m dł. × 0,7 m szer.), ułożonymi w czterech rzędach, a na każdej z nich przygotowano stanowisko pracy biurowej (rysunki 26 – 28). Wyposażenie każdego ze stanowisk było takie samo i składało się z komputera PC z monitorem ekranowym LED 27", krzesła oraz klawiatury i myszki. Parametry wyświetlania monitorów zostały ujednolicone na wszystkich stanowiskach. Rozlokowanie stanowisk jedynie w części pomieszczenia wynikało z umiejscowienia urządzeń i aparatury pomiarowej wykorzystywanych w równoległe prowadzonych badaniach. W pomieszczeniu wytworzono warunki oświetleniowe zgodne z rekomendacjami dla pomieszczeń biurowych z monitorami komputerowymi [7]. Oprawy oświetleniowe LED ściemniono uzyskując średnie natężenie oświetlenia na powierzchni stanowisk roboczych nieco przekraczające 500 lx. W celu zminimalizowania wpływu światła naturalnego na przebieg eksperymentu, żaluzje zewnętrzne były całkowicie zamknięte.



Rysunek 26. Plan pomieszczenia doświadczalnego 3.02 – rozmieszczenie stanowisk pracy (pomarańczowe) względem opraw oświetleniowych (żółte).

²⁷ Patrz: rozdz. 3.3, s. 87.



Rysunek 27. Pomieszczenie doświadczalne 3.02 przygotowane do eksperymentu; w tle widoczne okna (od podłogi do sufitu) zasłonięte zewnętrznymi żaluzjami.

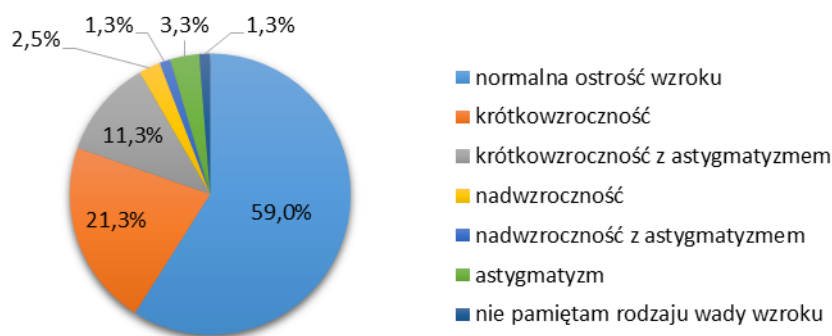


Rysunek 28. Wygląd przykładowego stanowiska pracy biurowej podczas eksperymentu.

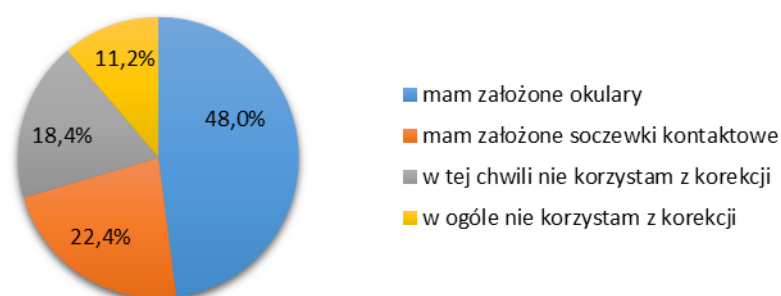
Uczestnicy

Uczestnicy badania zostali zrekrutowani spośród studentów Politechniki Krakowskiej z normalną ostrością wzroku oraz z wadami refrakcji ($n=239$, w tym 117 kobiet i 122 mężczyzn, wiek 18–25 lat, mediana: 21, średnia: 21,39, SD: 1,6). Wszyscy uczestnicy wyrazili zgodę na udział w eksperymencie. W badaniu wzięły udział jedynie osoby młode, jednakże zgodnie z literaturą nie obserwuje się wpływu wieku na preferencje oświetleniowe [346].

Większość osób badanych zadeklarowała, że nie ma zdiagnozowanej wady wzroku (59%) – patrz rysunek 29. Wśród pozostałych osób, większość stanowią krótkowidze (79,6%), u części których (34,6%) współwystępuje również astygmatyzm. Podczas badania, 70,4% uczestników ze zdiagnozowaną wadą wzroku korygowało ją za pomocą okularów lub soczewek kontaktowych (patrz rysunek 30).



Rysunek 29. Procentowy rozkład zadeklarowanych rodzajów wad wzroku u uczestników badania.



Rysunek 30. Procentowy rozkład metod korekcji wad wzroku podczas badania.

Przebieg badania

Uczestnicy przystępowali do eksperymentu w co najwyżej 20 osobowych grupach. Na początku każdej z sesji, osoby badane przez co najmniej 30 minut przebywały w ustabilizowanych warunkach oświetleniowych, wykonując zadania o charakterze pracy biurowej przy monitorze ekranowym LED. Warunki temperaturowo-wilgotnościowe w pomieszczeniu były stabilizowane oraz rejestrowane z wykorzystaniem systemu sterowania i automatyzacji budynku MLBE. Następnie, osoby badane, za pośrednictwem indywidualnych kwestionariuszy komputerowych, dokonywały oceny warunków oświetleniowych panujących w pomieszczeniu.

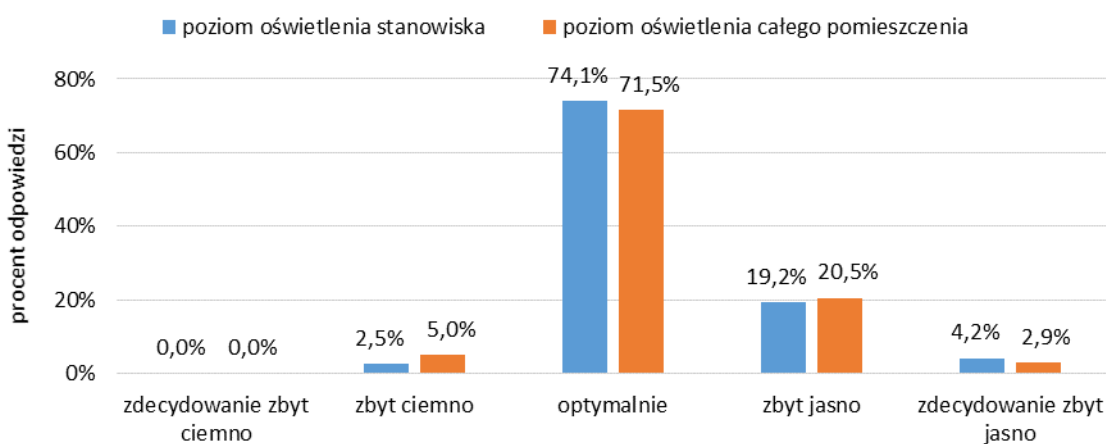
Poza oceną subiektywnych wrażeń oświetleniowych ludzi, w pomieszczeniu doświadczalnym rejestrowano:

- natężenie oświetlenia oraz parametry jakościowe oświetlenia (za pomocą luksomierza Everfine Z-10 oraz spektrometri Everfine SFIM-300),
- jakość napięcia zasilającego oprawy oświetleniowe (za pomocą analizatora Sonel PQM-700).

Analiza rejestracji potwierdziła stabilność czasową warunków oświetleniowych w trakcie badań i ich powtarzalność dla kolejnych grup doświadczalnych, a także zgodność warunków zasilania opraw oświetleniowych z normą PN-EN 50160 [366].

Rezultaty

Aż 74,1% respondentów stwierdziło, że poziom oświetlenia stanowiska spełnia ich oczekiwania, 23,4% uznało oświetlenie stanowiska za zbyt jasne lub zdecydowanie zbyt jasne, natomiast jedynie 2,5% oceniło je jako zbyt ciemne (patrz rysunek 31). Wśród osób, którym nie odpowiadały wytworzone warunki zdecydowana większość (90,3%) preferowała niższe natężenie oświetlenia. Zbliżone oceny uzyskano w odniesieniu do poziomu oświetlenia całego pomieszczenia (patrz rysunek 31). Między oceną poziomu oświetlenia stanowiska oraz całego pomieszczenia występuje zależność istotna statystycznie (prawdopodobieństwo testowe $p < 0,001$) – uczestnicy podobnie oceniali oświetlenie obu tych obszarów.



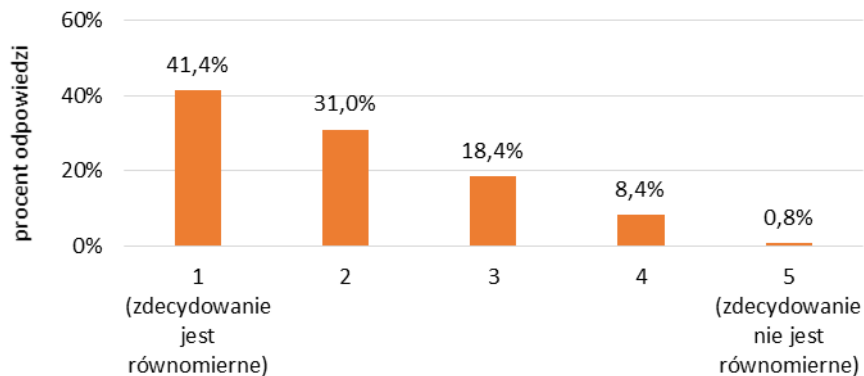
Rysunek 31. Ocena poziomu oświetlenia stanowiska oraz poziomu oświetlenia całego pomieszczenia.

Nie zaobserwowano zależności statystycznej między oceną poziomu oświetlenia stanowiska lub całego pomieszczenia przez kobiety i mężczyzn ($p > 0,05$, test chi-kwadrat), co jest zgodne z dotychczasowym stanem wiedzy [346]. Podobnie, brak jest różnic istotnych statystycznie w tych ocenach, u osób z normalną ostrością wzroku oraz z wadami refrakcji.

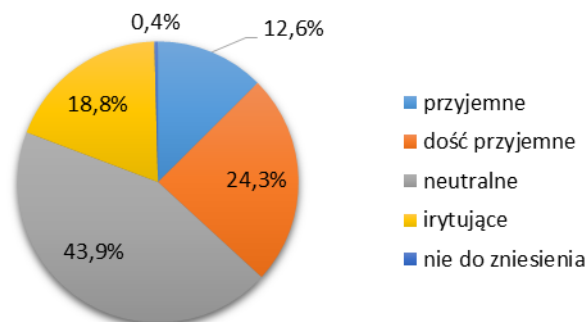
Wyniki subiektywnej oceny równomierności oświetlenia stanowiska przedstawiono na rysunku 32. Równomierność została oceniona średnio na 1,96 w skali od 1 (zdecydowanie jest równomierne) do 5 (zdecydowanie nie jest równomierne).

Ankietowani zostali także poproszeni o ocenę panujących w pomieszczeniu warunków oświetleniowych (mikroklimatu świetlnego). Zdaniem niemal połowy z nich (43,9%) warunki te były neutralne (patrz rysunek 33). Między tą oceną, a ocenami poziomu oświetlenia stanowiska pracy oraz całego pomieszczenia istnieją zależności istotne statystycznie ($p < 0,001$). Osoby, według których poziom oświetlenia pomieszczenia lub stanowiska był optymalny najrzadziej wskazywały, że wytworzony mikroklimat świetlny był irytujący lub nie do zniesienia (patrz rysunek 34). Przyjmując skalę ocen, w której warunki określane jako „nie do zniesienia” odpowiadają ocenie 1

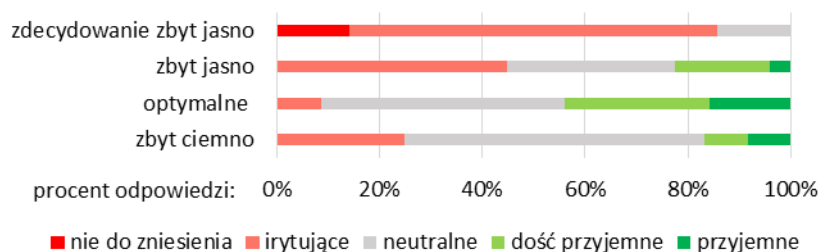
natomiast warunki „przyjemne” ocenie 5, najwyższe uśrednione oceny panujących w pomieszczeniu warunków oświetleniowych uzyskano u osób, które oceniły poziom oświetlenia stanowiska pracy (3,43) oraz całego pomieszczenia (3,51) jako optymalny. Dla oświetlenia ocenionego jako zbyt ciemne, średnie te wyniosły odpowiednio 3,33 oraz 3, natomiast dla ocenionego jako zbyt jasne, odpowiednio 3 oraz 2,82. Najniższe uśrednione oceny mikroklimatu świetlnego wystąpiły u osób, które oceniły oświetlenie jako zdecydowanie zbyt jasne (średnie odpowiednio 2,3 oraz 2).



Rysunek 32. Ocena równomierności oświetlenia stanowiska.



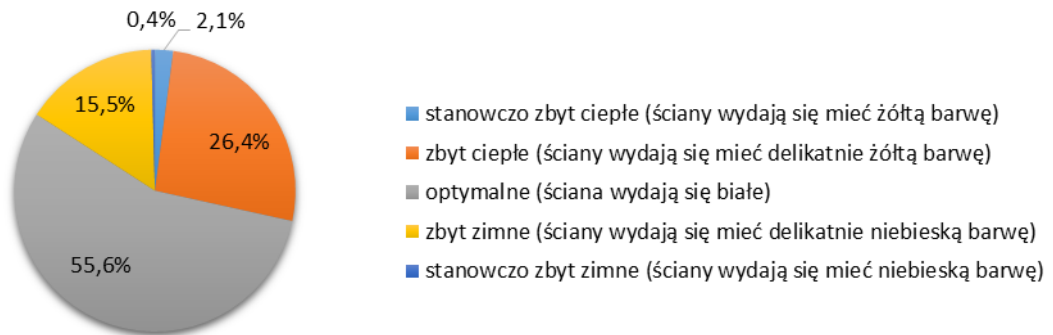
Rysunek 33. Procentowy rozkład ocen panujących w pomieszczeniu warunków oświetleniowych (mikroklimatu świetlnego).



Rysunek 34. Ocena panujących w pomieszczeniu warunków oświetleniowych w zależności od oceny poziomu oświetlenia całego pomieszczenia.

Uczestników zapytano również o odczucia dotyczące temperatury barwowej oświetlenia. Zdaniem ponad połowy z nich (55,6%) temperatura barwowa oświetlenia

(4000 K) była optymalna, 28,5% uznało oświetlenia za zbyt ciepłe lub stanowczo zbyt ciepłe, a 15,9% za zbyt zimne lub stanowczo zbyt zimne (patrz rysunek 35).



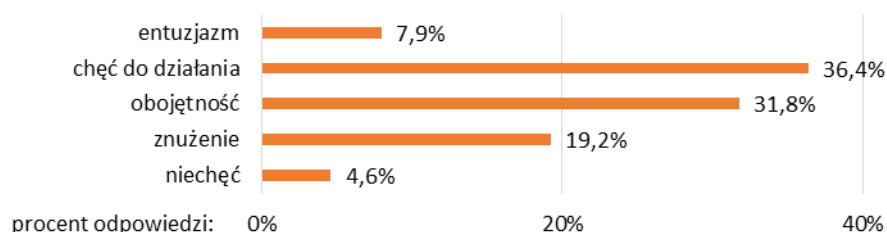
Rysunek 35. Procentowy rozkład ocen temperatury barwowej oświetlenia pomieszczenia.

Respondentów zapytano także o odczuwaną chęć do pracy. Dominującymi odczuciami była chęć do działania lub obojętność (patrz rysunek 36). Zaobserwowano występowanie zależności istotnej statystycznie ($p < 0,05$) między oceną poziomu oświetlenia stanowiska pracy, a odczuwaną chęcią do pracy. Nie zaobserwowano natomiast podobnej zależności w odniesieniu do oceny poziomu oświetlenia całego pomieszczenia ($p > 0,05$). Osoby, które uznały oświetlenie stanowiska za optymalne rzadziej odczuwały niechęć do pracy oraz znużenie (18,6%) niż osoby, które oceniły oświetlenie stanowiska za zbyt ciemne, zbyt jasne (odpowiednio 33,3% i 32,6%), bądź zdecydowanie zbyt jasne (70%) – patrz rysunek 37. Przyjmując skalę ocen, w której niechęć odpowiada ocenie 1 natomiast entuzjazm ocenie 5, najwyższą uśrednioną ocenę chęci do pracy zaobserwowano u osób, które oceniły poziom oświetlenia stanowiska pracy jako optymalny (3,37). Dla oświetlenia ocenionego jako zbyt ciemne średnia ta wyniosła 3,17, natomiast dla ocenionego jako zbyt jasne 2,96. Najniższą chęć do pracy zanotowano u osób, które oceniły oświetlenie jako zdecydowanie zbyt jasne (średnia 2,20).

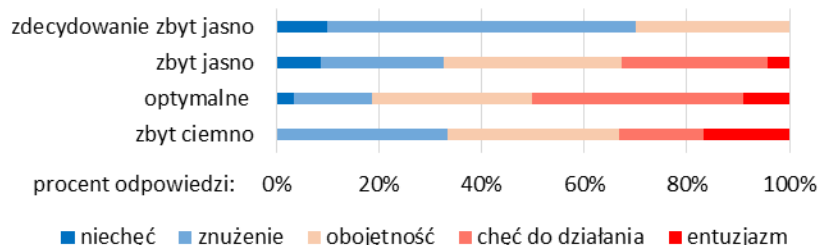
Oceniając wpływ oświetlenia na psychikę respondenci najczęściej wskazywali, że jest ono usypiające, uspokajające lub nużące (patrz rysunek 38). Występują zależności istotne statystycznie pomiędzy oceną poziomu oświetlenia stanowiska, a uznawaniem oświetlenia za uspokajające ($p < 0,001$), relaksujące ($p < 0,05$), usypiające ($p < 0,05$), przygnębiające ($p < 0,05$) oraz denerwujące ($p < 0,001$). Podobnie, zaobserwowano zależności istotne statystycznie pomiędzy oceną poziomu oświetlenia całego pomieszczenia, a oceną oświetlenia jako uspokajające ($p < 0,05$) oraz denerwujące ($p < 0,001$). Największy odsetek opinii o uspokajającej własności oświetlenia wystąpił w grupach osób, które wskazywały na optymalny poziom oświetlenia stanowiska (32,2%, wśród pozostałych ocen $< 5\%$) lub przestrzeni pomieszczenia (31%, wśród pozostałych ocen $< 17\%$). Podobnie na relaksującą właściwość oświetlenia wskazywało 18,6% respondentów, dla których poziom oświetlenia stanowiska był optymalny (wśród pozostałych ocen $< 1\%$). Na usypiającą

właściwość oświetlenia zwróciły uwagę głównie osoby, które oceniły oświetlenie stanowiska jako zbyt ciemne (83,3%, wśród pozostałych ocen <30,4%). Oświetlenie było denerwujące dla większości osób uznających oświetlenie stanowiska (60%, wśród pozostałych ocen <20%) lub pomieszczenia (85,7%, wśród pozostałych ocen <33%) za zdecydowane zbyt jasne.

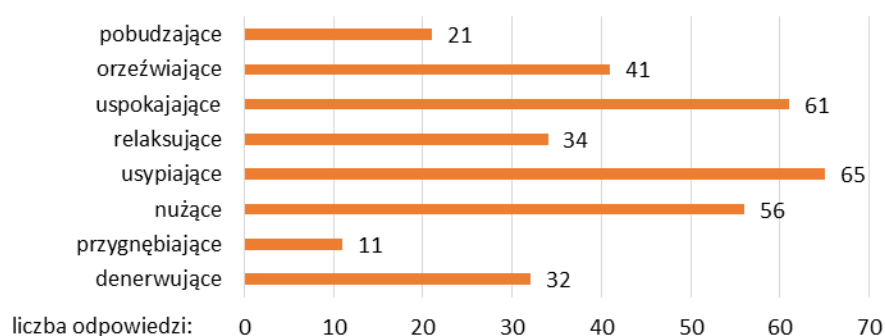
Niemal 43% uczestników badania nie odczuwało żadnych objawów zmęczenia oczu (patrz rysunek 39). Pozostali respondenci najczęściej skarżyli się na ciężkie powieki, pieczenie czy ból oczu. Często zgłaszanymi dolegliwościami były także rozmazany obraz i ból głowy. Rzadziej występowały objawy takie jak piasek pod powiekami czy łzawienie. Między oceną poziomu oświetlenia stanowiska, a brakiem odczuwanych objawów zmęczenia oczu istnieje zależność istotna statystycznie ($p < 0,05$). Wśród osób, które określiły poziom oświetlenia stanowiska jako optymalny niemal połowa (49,7%) nie zgłaszała żadnych objawów zmęczenia oczu. W przypadku pozostałych ocen odsetek ten był niższy (patrz rysunek 40).



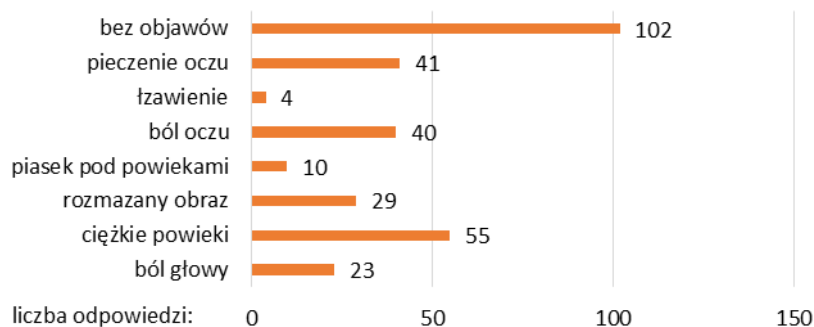
Rysunek 36. Ocena chęci do pracy.



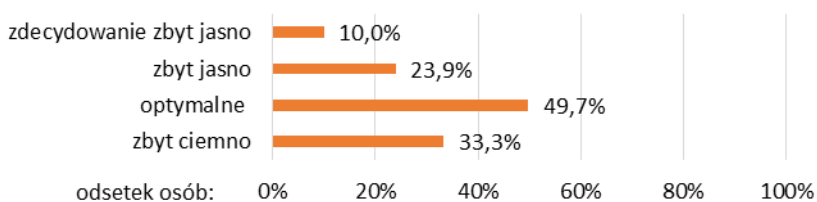
Rysunek 37. Ocena chęci do pracy w zależności od oceny poziomu oświetlenia stanowiska.



Rysunek 38. Ocena oddziaływania oświetlenia na psychikę.

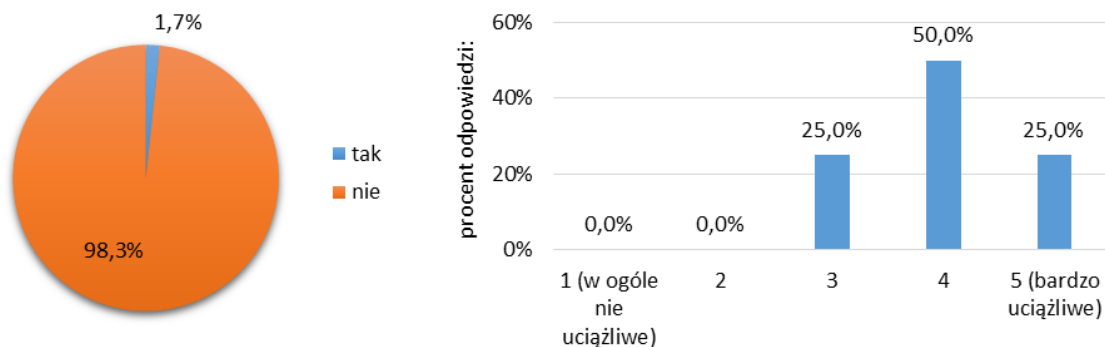


Rysunek 39. Odczuwane objawy zmęczenia oczu.



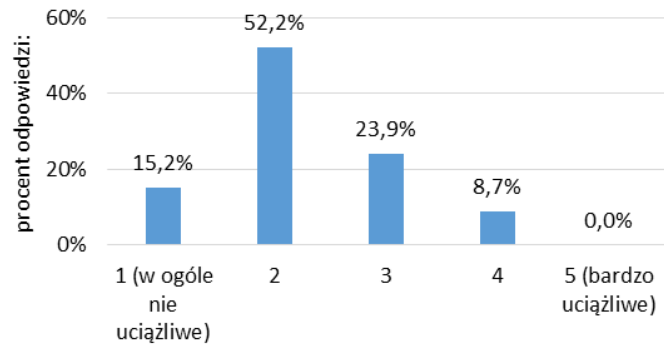
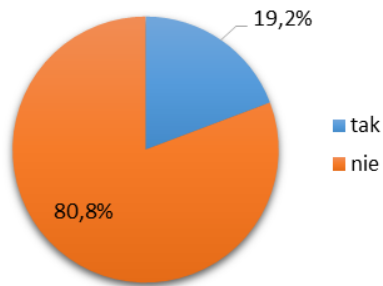
Rysunek 40. Odsetek osób, które nie zgłaszały objawów zmęczenia oczu w zależności od oceny poziomu oświetlenia stanowiska.

Ponad 98% uczestników doświadczenia nie zgłaszało zastrzeżeń dotyczących migotania oświetlenia (patrz rysunek 41). Osoby, które dostrzegały migotanie oświetlenia oceniły uciążliwość tego zjawiska średnio na 4 w skali od 1 (w ogóle nie uciążliwe) do 5 (bardzo uciążliwe).



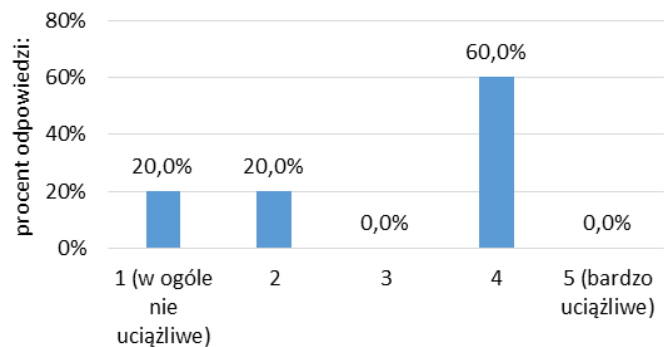
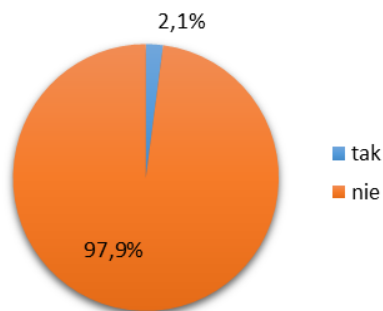
Rysunek 41. Procentowy rozkład ocen występowania migotania oświetlenia oraz w przypadku odpowiedzi „tak” ocena jego uciążliwości.

Nieco ponad 19% respondentów przyznało, że odnosi wrażenie zniekształcenia barw skóry lub przedmiotów w pomieszczeniu, a uciążliwość tego zjawiska określili średnio na 2,26 (patrz rysunek 42).



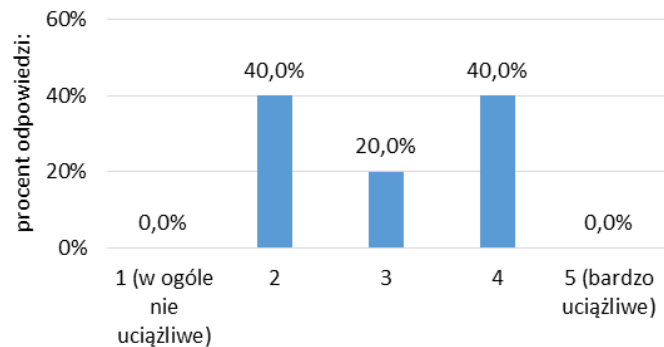
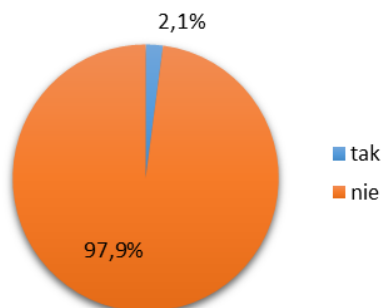
Rysunek 42. Procentowy rozkład ocen występowania zniekształcenia barw oraz w przypadku odpowiedzi „tak” ocena jego uciążliwości.

Jedynie 2,1% uczestników badania zauważyło jaskrawe odbicia słońca w monitorze komputera. Uciążliwość tego zjawiska ocenili oni średnio na 3 (patrz rysunek 43).



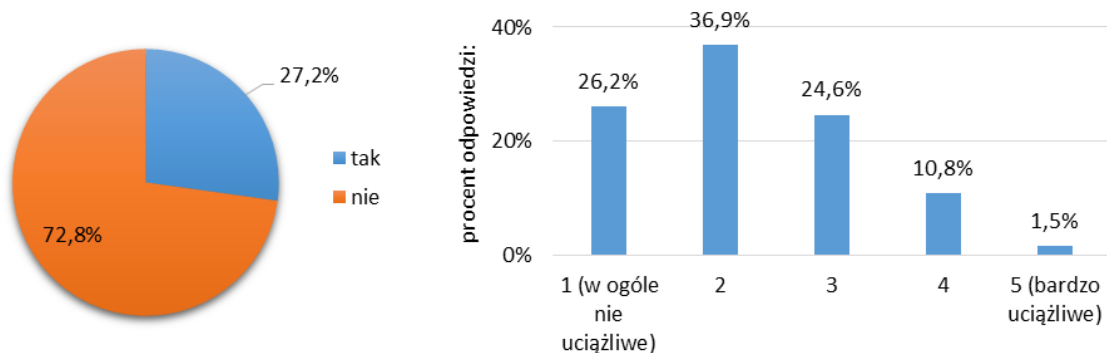
Rysunek 43. Procentowy rozkład ocen występowania jaskrawego odbicia słońca w monitorze komputera oraz w przypadku odpowiedzi „tak” ocena jego uciążliwości.

Ten sam odsetek uczestników badania zauważył jaskrawe odbicia lamp w monitorze komputera. Średnia uciążliwość tego zjawiska wyniosła 3 (patrz rysunek 44).



Rysunek 44. Procentowy rozkład ocen występowania jaskrawych odbić lamp w monitorze komputera oraz w przypadku odpowiedzi „tak” ocena ich uciążliwości.

Co czwarty respondent (27,2%) zaobserwował jaskrawe odbicia światła na elementach pomieszczenia, określając uciążliwość tego zjawiska średnio na 2,25 (patrz rysunek 45).



Rysunek 45. Procentowy rozkład ocen występowania jaskrawych odbić światła na elementach pomieszczenia oraz w przypadku odpowiedzi „tak” ocena ich uciążliwości.

Wnioski

Przedstawione wyniki pokazują, że podczas pracy w nowoczesnej przestrzeni biurowej wyposażonej w lampy i monitory typu LED, znacząca liczba osób preferuje natężenie oświetlenia na stanowisku pracy niższe niż rekomendowane 500 lx. Tym samym, w przestrzeni tej potwierdzono zasadność powyższego wniosku wynikającego z analizy dotychczasowych badań prowadzonych w środowiskach biurowych wyposażonych w lampy fluorescencyjne i stanowiska pracy z monitorami CRT²⁸. W związku z tym można oczekiwać, że umożliwienie indywidualnej regulacji natężenia oświetlenia stanowiskach będzie zapewniało dodatkowe oszczędności energii podczas obecności użytkowników.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że gdy 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. Ponadto, osoby te częściej wskazują, że oświetlenie jest uspokajające lub relaksujące, a także najrzadziej odczuwają objawy zmęczenia oczu.

²⁸ Patrz: rozdz. 3.2, s. 85.

4. Propozycja metody spersonalizowanego sterowania oświetleniem ogólnym

4.1. Potrzeba regulacji indywidualnej w biurach wieloosobowych

Warunki mikroklimatyczne wewnątrz charakteryzowane przez takie parametry jak oświetlenie, temperatura powietrza, wilgotność powietrza, prędkość ruchu powietrza, hałas czy drgania wpływają na komfort i zdrowie ludzi, ich zachowanie, ogólną ocenę jakości środowiska pracy, a także wydajność pracy [367]. Dzięki systemom automatycznego sterowania, niektóre z tych parametrów mogą być kontrolowane.

W dotychczasowych badaniach skupiano się przede wszystkim na poszukiwaniu szeroko akceptowalnego, uniwersalnego zestawu parametrów, które mogłyby być odgórnie i w sposób jednolity utrzymywane w całym pomieszczeniu. Podejście to prowadzi jednak do niepotrzebnego zużycia energii, pomija personalne potrzeby w zakresie komfortu cieplnego i wizualnego [368, 369], a także nie daje poczucia kontroli.

Ludzie mają silną potrzebę kontroli, a brak wpływu na wydarzenia lub otoczenie wywołuje dyskomfort [51]. Dlatego, alternatywne podejście zakłada udostępnienie użytkownikom możliwości kontrolowania warunków mikroklimatycznych w pomieszczeniu²⁹. Użyteczność systemów o tej funkcjonalności bywa jednak ograniczona z powodu obecności wielu osób w pomieszczeniu. Użytkownicy biur prywatnych częściej dostosowują nastawy do własnych preferencji, niż użytkownicy biur typu *open space* [51]. Pomimo odczuwanego dyskomfortu, ci drudzy pozostają bierni ponieważ nie chcą narażać się na potencjalny konflikt z współpracownikami, bądź nie chcą przyciągać ich uwagi [264]. Nastawy systemów zmieniają zazwyczaj te same osoby (często o dominującej osobowości). W przypadku oświetlenia użytkownicy regulują je zazwyczaj pod nieobecność innych osób lub w sposób, który nie przyciąga uwagi współpracowników tj. bardzo powoli lub gdy pomieszczenie jest wypełnione światłem dziennym [283, 51].

Zastosowanie strefowego sterowania oświetleniem w biurze typu *open space*, prowadzi to do zmniejszenia liczby użytkowników przypadających na grupę wspólnie sterowanych lamp, co powinno złagodzić wspomniane problemy oraz ułatwić wypracowanie kompromisowych nastaw oświetlenia [278]. Pomimo to użytkownicy nie rozmawiają z sąsiadami o swoich preferencjach, ani nie dążą do osiągnięcia konsensusu [51]. Zaobserwowano także, że wraz ze wzrostem rozmiaru stref rośnie niechęć użytkowników do wprowadzania zmian nastaw [52].

²⁹ Bywa, że oferowana jest jedynie iluzoryczna kontrola. Przykładowo w odniesieniu do sterowania temperaturą w pomieszczeniu, powszechną praktyką jest montowanie pozornych zadajników (*placebo button*), których użycie nie wywiera żadnego wpływu na proces sterowania, bądź wywiera znikomy wpływ. Wywołuje natomiast złudzenie sprawczości, co ma zabiegać zgłaszaniu skarg [51].

Można zatem stwierdzić, że w przypadku dużych, wieloosobowych pomieszczeń możliwości swobodnego indywidualnego dostosowywania jego parametrów ograniczają się w zasadzie do dostosowania ustawień komputera i krzesła.

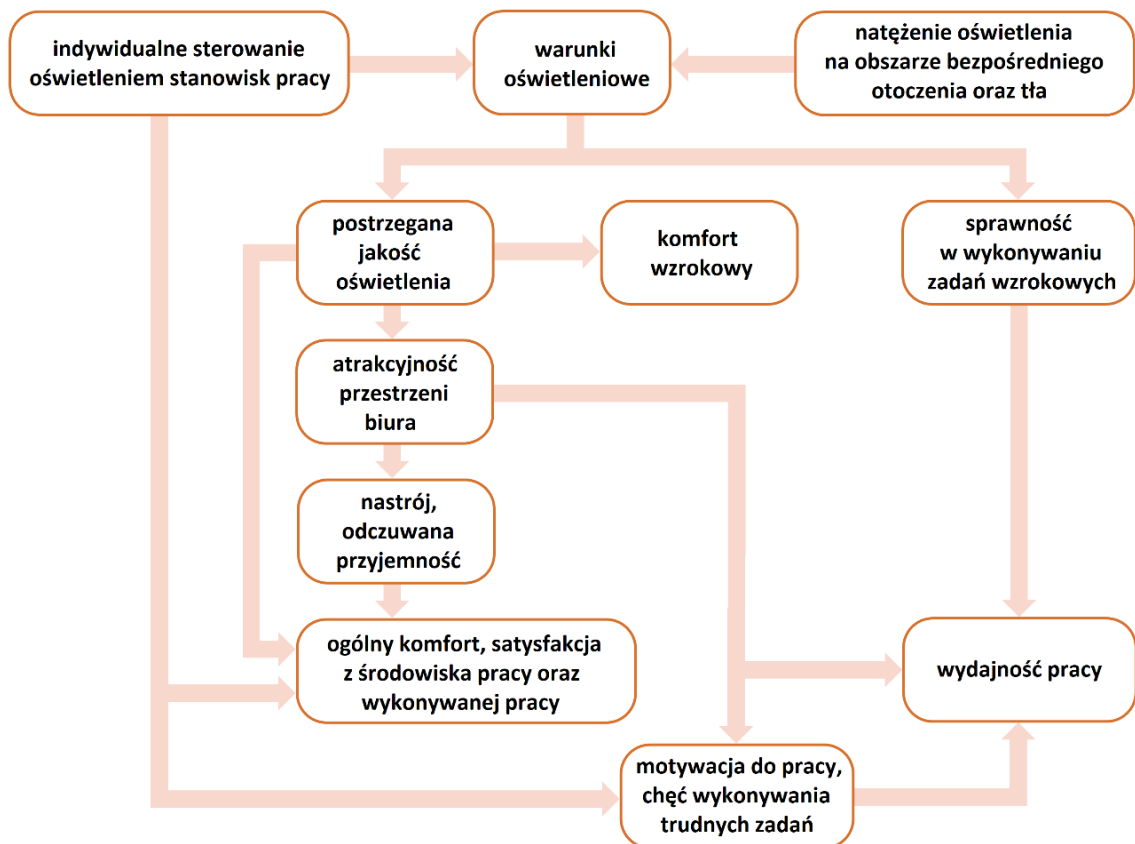
Idea systemów osobistej kontroli środowiska (PEC - *personal environmental control*) zakłada wytworzenie wokół każdego użytkownika lokalnej strefy preferowanych przez niego warunków mikroklimatycznych [270, 368, 369]. Wykazano, że udostępnienie rozwiązań umożliwiających tego typu personalizację stanowiska pracy podnosi wydajność i satysfakcję z wykonywanej pracy, a także poprawia komfort [133, 270]. Ponadto koordynacja między systemami osobistej kontroli, a systemem zarządzania budynkiem pozwoli na efektywniejsze gospodarowanie energią. Energia będzie mogła być jeszcze precyzyjniej kierowana do miejsc zapotrzebowania, niż ma to miejsce w obecnych budynkach typu *smart* – gdzie najmniejszą wydzieloną strefę zapotrzebowania stanowi zazwyczaj całe pomieszczenie.

Oświetlenie jako element systemów osobistej kontroli środowiska

Jednym z obszarów systemów osobistej kontroli środowiska jest indywidualne oświetlenie stanowisk pracy. W tradycyjnych systemach oświetleniowych im wyższa jest bezwzględna różnica natężenia oświetlenia na stanowisku od preferowanej wartości, tym gorzej ludzie oceniają swój nastrój, jakość oświetlenia i ogólną satysfakcję z warunków środowiskowych, a także mają silniejsze pragnienie zmiany warunków oświetleniowych [127, 351]. Zmniejszenie tej różnicy jest możliwe dzięki udostępnieniu użytkownikom możliwości regulacji oświetlenia indywidualnych stanowisk pracy według personalnych preferencji.

Doświadczenia z amerykańskich boksów biurowych pokazują, że samo udostępnienie pracownikom możliwości lokalnego sterowania oświetleniem, w sposób bezpośredni podnosi motywację do pracy i ułatwia utrzymanie koncentracji uwagi (dzięki czemu zwiększa wydajność pracy), poprawia komfort, a także podnosi satysfakcję z środowiska pracy i wykonywanej pracy (patrz rysunek 46) [110, 339, 350]. Dzięki temu, że wytwarzane warunki oświetleniowe odpowiadają personalnym preferencjom, ludzie postrzegają oświetlenie swojego stanowiska jako wysokiej jakości. U osób tych, obserwuje się niższą liczbę zażaleń dotyczących oświetlenia oraz – co ciekawe – temperatury, które przeszkadzają im w pracy [110]. Wysoka ocena jakości oświetlenia powoduje, że również przestrzeń biura jest oceniana jako bardziej atrakcyjna. Przebywając w wysokiej jakości środowisku pracy ludzie mają lepszy nastrój i samopoczucie pod koniec dnia, są bardziej zmotywowani i pracują wydajniej [81, 370], odczuwają wyższy komfort, a także są bardziej usatysfakcjonowani z wykonywanej pracy i jej środowiska [110, 127, 351, 50]. Rzadziej zgłaszają także symptomy dyskomfortu fizycznego lub psychicznego, dzięki czemu lepiej śpią [367]. Oznacza to, że lokalne sterowanie oświetleniem wpływa na komfort i satysfakcję pracowników bezpośrednio – poprzez samo udostępnienie takiej możliwości, a także

w sposób pośredni – poprzez wytwarzane warunki oświetleniowe odpowiadające indywidualnym upodobaniom.



Rysunek 46. Mapa oddziaływania systemu indywidualnego sterowania oświetleniem na pracownika. Rysunek na podstawie [345].

Koncepcja metody spersonalizowanego sterowania oświetleniem ogólnym

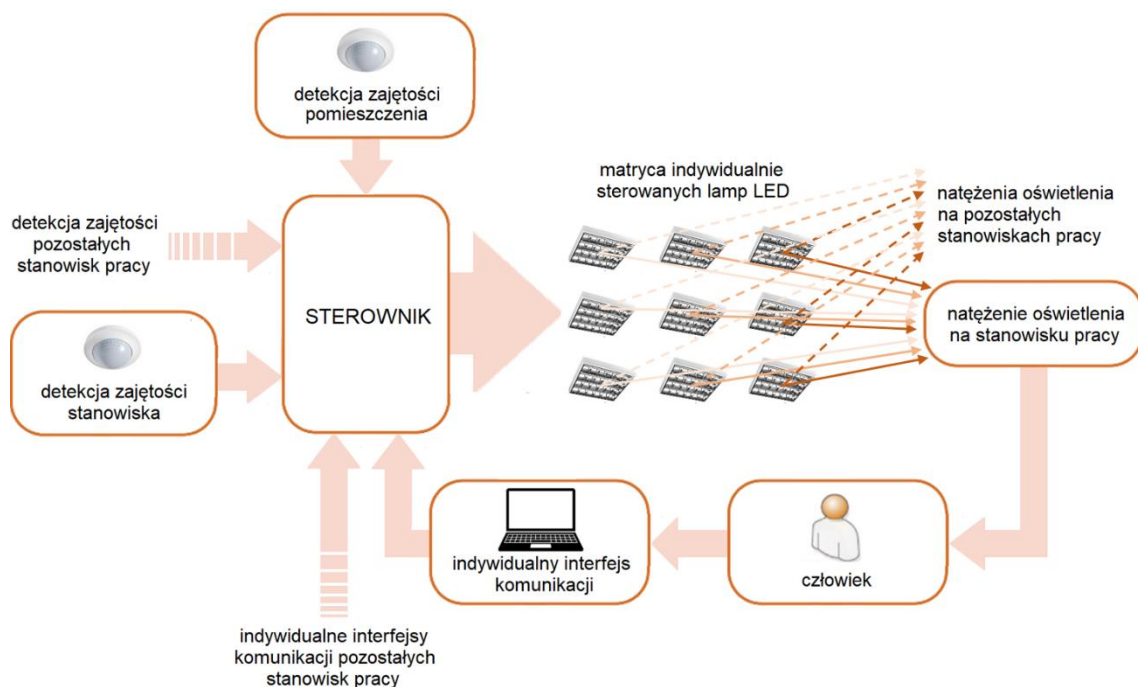
Zasadniczym celem proponowanej metody spersonalizowanego sterowania oświetleniem ogólnym jest minimalizacja zużycia energii poprzez zaspokojenie indywidualnych potrzeb oświetleniowych każdego z użytkowników.

Na rysunku 47 przedstawiono koncepcję metody spersonalizowanego sterowania oświetleniem ogólnym w biurze typu *open space*, na przykładzie jednego ze stanowisk pracy. Scenariusz działania rozpoczyna się od wykrycia obecności pierwszego użytkownika. Oświetlenie jest automatycznie uruchamiane w całym pomieszczeniu. Następnie użytkownik zajmuje stanowisko pracy (ustalone lub dowolne³⁰). Na podstawie utrwalonej informacji o jego preferencjach, lokalnie na obszarze zadania zapewniany jest oczekiwany poziom oświetlenia. Gdy do pomieszczenia wchodzi

³⁰ W przypadku stanowiska przypisanego na stałe jednemu użytkownikowi wystarczy, że w celu identyfikacji użytkownika wykrywana będzie zajętość stanowisk (ustawienia oświetlenia są przypisane do stanowisk). W przypadku stanowisk współużytkowanych przez różnych pracowników, użytkownik po jego zajęciu powinien zostać niezależnie zidentyfikowany (ustawienia oświetlenia są przypisane do użytkownika). Metody wykrywania zajętości oraz identyfikacji zestawiono w tabeli 5.

kolejni użytkownicy schemat działania powtarza się i na następnych zajmowanych przez nich stanowiskach wytwarzane są preferowane poziomy oświetlenia. W przypadku nowego użytkownika (którego preferencje są nieznanymi) na zajęty przez niego stanowisku jest wytwarzane pewne początkowe natężenie oświetlenia, które później może on dostosować według własnych upodobań. Gdy któryś z użytkowników opuści swoje stanowisko, po pewnym czasie jego oświetlenie zostaje automatycznie przyćmione. Po powrocie użytkownika preferowane oświetlenie jest ponownie przywracane według ostatniej zapamiętanej nastawy. W ciągu dnia system pozostaje w ciągłej interakcji z obecnymi użytkownikami, którzy za pośrednictwem indywidualnych interfejsów komunikacji³¹ mają możliwość bieżącej korekty poziomu oświetlenia (na zasadzie jaśniej / ciemniej), zmiany aktualnego profilu aktywności (np. czytanie z ekranu, czytanie tekstu drukowanego, pisanie na papierze, pisanie na klawiaturze), bądź zapamiętania nowych ustawień dla wybranego profilu. Preferowane przez poszczególnych użytkowników poziomy oświetlenia dla różnych rodzajów zadań wzrokowych zostają zapamiętane i mogą być w każdej chwili przywołane. Na koniec dnia, po opuszczeniu pomieszczenia przez wszystkich pracowników, oświetlenie w pomieszczeniu jest automatycznie wyłączone.

Proponowana metoda personalizowanego sterowania oświetleniem ogólnym łączy zatem regulację indywidualną oraz sterowanie od zajętości na poziomie lokalnym – poszczególnych stanowisk pracy.



Rysunek 47. Koncepcja metody personalizowanego 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.

³¹ Patrz: rozdz. 2.4, s. 46.

4.2. Problematyka lokalnego sterowania oświetleniem w biurach typu *open space*

Biura wielkopowierzchniowe we wspólnej przestrzeni gromadzą wiele osób, które wykonują różnorodne zadania, zachowują się w różny sposób, a także cechują się zróżnicowanymi preferencjami oświetleniowymi [47, 48]. Taka współdzielona i otwarta koncepcja utrudnia wdrożenie systemów mających zaspokoić indywidualne potrzeby oświetleniowe, w porównaniu z biurami prywatnymi lub komórkowymi.

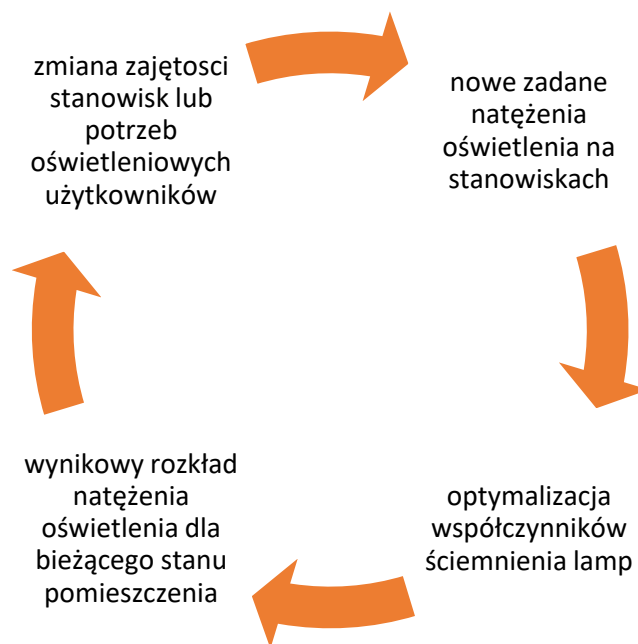
Położenie lamp względem stanowisk pracy określa jak skutecznie dostarczają one światło do poszczególnych przestrzeni roboczych [48]. Z tego względu, z punktu widzenia sterowania na poziomie lokalnym korzystne jest, aby nad każdym stanowiskiem była umieszczona niezależnie sterowana oprawa oświetleniowa, tak aby użytkownik mógł nią sterować podobnie jak ma to miejsce w przypadku lampy biurkowej.

Siatka lamp pokrywająca się z układem stanowisk jest zazwyczaj stosowana w biurach wyposażonych w boksy, dzięki czemu każdy z pracowników ma swoją „własną” lampę, a jej oddziaływanie na sąsiednie stanowiska jest dodatkowo ograniczone przez przegrody. Dlatego, w tego typu biurach, wdrożenie lokalnego sterowania oświetleniem jest łatwiejsze niż w biurach o otwartej przestrzeni.

W biurach typu *open space*, lampy są najczęściej równomiernie rozmieszczone w postaci prostokątnej siatki³², która zazwyczaj nie pokrywa się z układem biurek. Zatem, próbując przypisać lampy do określonych stanowisk, dla części użytkowników będzie oczywiste, która oprawa jest powiązana z ich miejscem pracy, natomiast pozostali mogą mieć miejsca pracy umieszczone między oprawami lub nawet mieć poczucie sterowania „światłem innej osoby” [50]. Z kolei dostosowanie rozmieszczenia biurek do układu lamp w eksploatowanym budynku w praktyce jest trudne do wykonania [48, 292]. Ponadto natężenie oświetlenia na danym stanowisku wynika z oddziaływania wszystkich opraw oświetleniowych [172, 279] i pochodzi zarówno od ich promieni świetlnych padających bezpośrednio jak i tych odbitych od powierzchni pomieszczenia. W związku z tym, sterowanie jasnością pojedynczej lampy zmienia natężenie oświetlenia na wielu stanowiskach.

W pomieszczeniach o otwartej przestrzeni tradycyjne metody sterowania nie sprawdzają się – sterując pojedynczymi lampami trudno jest sprostać zróżnicowanym preferencjom oświetleniowym użytkowników i jednocześnie maksymalizować efektywność energetyczną systemu [285]. Dlatego wszystkie indywidualnie sterowane lampy należy rozważać jako jeden wspólny system oświetleniowy i optymalizować jako całość [172]. Schemat ideowy proponowanej metody sterowania przedstawiono na rysunku 48.

³² Patrz: rozdz. 1.1, s. 14.



Rysunek 48. Schemat ideowy metody spersonalizowanego sterowania oświetleniem ogólnym w otwartej przestrzeni biurowej.

Dynamiczne oświetlenie, a komfort użytkowników

W przeciwieństwie do sterowania na poziomie pomieszczenia, podczas którego wytwarzane warunki oświetleniowe pozostają zbliżone w przestrzeni pomieszczenia i niezmiennie w czasie, lokalne sterowanie oświetleniem skutkuje dynamicznym oświetleniem [268]. Wobec tego wdrożenie tego typu sterowania w biurach *typu open space* wymaga zwrócenia szczególnej uwagi na komfort wizualny wszystkich osób obecnych w pomieszczeniu [47, 277].

W normie PN-EN 12464-1:2012 [7] brak jest wytycznych dotyczących dynamiki zmian oświetlenia podczas jego włączania, wyłączenia, ściemniania lub rozjaśniania, a także wpływu tych zjawisk na komfort użytkowników. W literaturze zwraca się jednak uwagę, że zmiany natężenia oświetlenia mogą stanowić czynnik rozpraszający uwagę (obok dźwięku, temperatury, wentylacji, obecności osób, zapachu, światła słonecznego), który może prowadzić do irytacji i obniżenia wydajności pracy [371, 268, 276].

W wielkopowierzchniowych biurach wyposażonych w boksy potwierdzono wysoką akceptację dla lokalnego sterowania oświetleniem, które było preferowane w porównaniu ze sterowaniem centralnym [303]. W biurach tego typu, dzięki zastosowanym przegrodom pole widzenia użytkowników jest ograniczone, przez co są oni w stanie dostrzec zmiany w poziomie oświetlenia jedynie bezpośrednio w sąsiedztwie swojego stanowiska [47, 277, 350].

W biurach *typu open space* pracownicy mają w polu widzenia przestrzeń pomieszczenia, przez co lokalne zmiany warunków oświetleniowych są widoczne dla wielu osób [47, 277, 48, 268]. Badania przeprowadzone w tego typu biurach w Holandii

wykazały, że zmiany warunków oświetlenia sztucznego nie są bardziej rozpraszające od innych czynników środowiskowych, choć dla niektórych osób są nieakceptowalne [371]. W celu ograniczenia dyskomfortu wywołanego zmianami w oświetleniu otwartych przestrzeni biurowych proponuje się:

- stosowanie łagodnych przejść między stanami oświetlenia poprzez powolne ściemnianie i rozjaśnianie lamp (do kilkudziesięciu luksów na sekundę [372]), co wynika z wysokiej tolerancji ludzi dla powolnych zmian natężenia oświetlenia³³, a także nawiązuje do płynnych zmian światła naturalnego,
- ściemnianie oświetlenia niezajmowanych stanowisk zamiast jego całkowitego wyłączenia w celu zapewnienia łagodniejszego kontrastu między zajmowanymi i pustymi stanowiskami.

4.3. Dobór modelu symulacyjnego pomieszczenia doświadczalnego

Kolejnym etapem na drodze do zweryfikowania tezy postawionej w pracy jest opracowanie modelu, który będzie umożliwiał symulację rozkładu natężenia oświetlenia przy różnych wariantach pracy systemu lokalnego sterowania oświetleniem ogólnym. Jako platformę do opracowania modelu i prowadzenia obliczeń symulacyjnych wybrano program DIALux, który jest uznanym na świecie narzędziem wspomagającym projektowanie oświetlenia [373, 374, 375, 376].

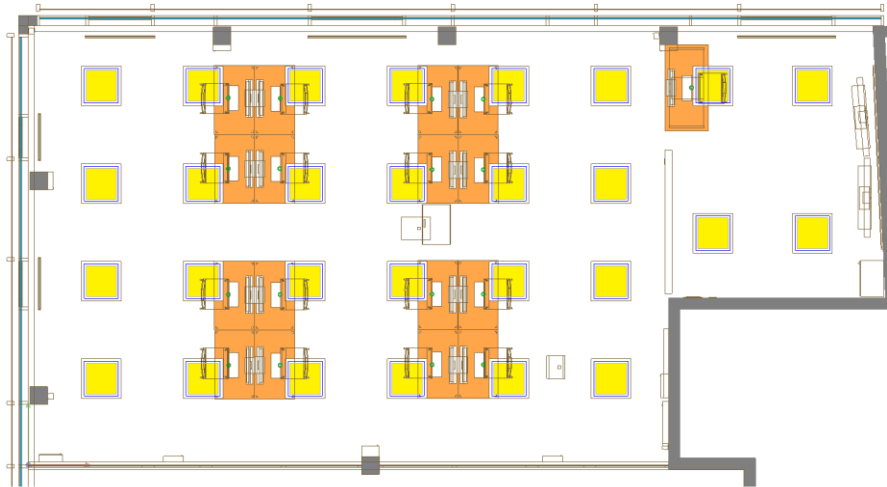
Do badań opisywanych w tej oraz kolejnych częściach pracy wykorzystano pomieszczenie doświadczalne 4.02³⁴. W pomieszczeniu przygotowano 17 stanowisk pracy biurowej (16 stanowisk składających się z ławki o wymiarach 1,2 m dł. × 0,7 m szer. oraz krzesła, a także jedno stanowisko z biurkiem o wymiarach 1,5 m dł. × 0,75 m szer.). Stanowiska rozmieszczono w układzie charakterystycznym dla biur typu *open space*, uwzględniając typowe ich niedopasowanie względem siatki lamp (patrz rysunek 49). W rozważaniach przyjęto uproszczenie polegające na zaniechaniu uwzględniania monitorów na stanowiskach oraz sylwetek siedzących pracowników, które w rzeczywistym pomieszczeniu stanowią przeszkody ograniczające oddziaływanie części oddalonych lamp na obszar zadania z uwagi na zacienianie.

Współcześnie stosowane metody komputerowego wspomaganie projektowania umożliwiają dobór opraw oświetleniowych, ich rozplanowanie przestrzenne i wykonanie obliczeń parametrów otoczenia świetlnego, a także realistyczną wizualizację projektowanego oświetlenia przestrzeni [35, 377]. Metody te mają jednak pewne ograniczenia i wady stosowania, które wynikają z dokładności danych wejściowych (dotyczących cech fizycznych modelowanej przestrzeni oraz opraw oświetleniowych) jak i samych algorytmów obliczeń [378]. Zatem uzyskiwane wyniki

³³ Patrz: rozdz. 3.2, s. 87.

³⁴ Patrz: rozdz. 3.3, s. 87.

symulacji nie zawsze wiernie odwzorowują otoczenie świetlne uzyskiwane w rzeczywistym pomieszczeniu.



Rysunek 49. Plan pomieszczenia doświadczalnego 4.02 – rozmieszczenie stanowisk pracy (pomarańczowe) względem opraw oświetleniowych (żółte).

Ponieważ w rozważanym przypadku modelowane jest istniejące pomieszczenie, znane jest rozmieszczenie opraw oświetleniowych, a także – inaczej niż w praktyce projektowania oświetlenia – dokładne wymiary pomieszczenia, wyposażenie i zastosowane materiały. Wobec tego problem doboru właściwego modelu do dalszych badań sprowadzał się do doświadczalnego przejścia stopnia szczegółowości modelu (liczby uwzględnianych elementów pomieszczenia oraz złożoności geometrycznej ich odwzorowania), według kryterium najwyższej zbieżności rezultatów symulacji z wynikami pomiarów uzyskanych w środowisku rzeczywistym oraz akceptowalnego czasu obliczeń pojedynczej sceny świetlnej.

Pomiary rozkładu natężenia oświetlenia w pomieszczeniu doświadczalnym

Siatkę oświetleniową dla celów pomiarów natężeń oświetlenia i walidacji modelu przyjęto według zaleceń normy PN-EN 12464-1:2012 [7] – o oczkach kwadratowych i długości boku równej 0,25 m. łącznie uzyskano 1425 punktów rozmieszczonych równomiernie na płaszczyźnie poziomej, na wysokości 0,85 m nad powierzchnią podłogi (patrz rysunek 18).

Pomiary natężenia oświetlenia wykonane zostały za pomocą urządzenia Everfine SFIM-300, przy wykorzystaniu bezprzewodowego modułu pomiarowego zamontowanego na statywie zgodnie z poziomą płaszczyzną pomiarową (patrz rysunek 50). Statyw był umieszczany w kolejnych punktach siatki pomiarowej, a sam pomiar był inicjowany na odległość w celu ograniczenia oddziaływania eksperymentatora na wyniki. W celu zminimalizowania udziału światła pochodzącego spoza pomieszczenia pomiary wykonywane były w nocy przy zamkniętych żaluzjach zewnętrznych. Bezpośrednio przed rozpoczęciem pomiarów, w celu ustabilizowania parametrów

pracy źródeł światła były one włączone i pracowały w sposób nieprzerwany przez kilkadziesiąt minut. Pomiary prowadzono przy najwyższej nastawie lamp. Z wykorzystaniem systemu BACS stabilizowano i rejestrowano warunki mikroklimatyczne w pomieszczeniu, które podczas wykonywania pomiaru wynosiły:

- temperatura powietrza: 21,5°C – 22,3°C,
- wilgotność względna powietrza: 28,5% – 30,8%.



Rysunek 50. Statyw z bezprzewodowym modulem pomiarowym oraz baza miernika SFIM-300 i komputer wraz z oprogramowaniem pomiarowym podczas prowadzenia pomiaru.

Modelowanie pomieszczenia doświadczalnego w oprogramowaniu symulacyjnym

Podstawę dla opracowania modelu stanowiła szczegółowa inwentaryzacja pomieszczenia obejmująca jego wymiary, rozmieszczenie wyposażenia, a także cechy zastosowanych materiałów. Materiały wykorzystywane w pomieszczeniu badanym wraz z przyjętymi w modelu komputerowym współczynnikami odbicia lub przepuszczania światła zestawiono w tabeli 14.

Tabela 14. Charakterystyka materiałów wykorzystywanych w pomieszczeniu badanym oraz współczynników odbicia lub przepuszczania światła przyjętych w modelu komputerowym [357, 373]

| element pomieszczenia | materiał wykorzystywany w pomieszczeniu rzeczywistym oraz współczynnik odbicia (ρ) lub przepuszczania (τ) światła przyjęty w modelu komputerowym |
|---|---|
| podłoga | plytki dywanowe wielokolorowe ($\rho=38\%$); plytki ceramiczne szare na korytarzu ($\rho=36\%$) |
| ściany, słupy, elementy z płyt gipsowo-kartonowych w okolicach sufitu | malowane na biało ($\rho=70\%$) |
| sufit | betonowy niemalowany ($\rho=60\%$) |
| stolarka okienna i drzwiowa | metalowa, malowana na kolor ciemnoszary RAL7039 ($\rho=17\%$); drzwi na korytarzu drewniane w kolorze dąb sonoma ($\rho=55\%$) |
| przeszklenia | szklenie bezbarwne, w ścianach działowych oraz balustradach szyba pojedyncza ($\tau=90\%$), w ścianach zewnętrznych szyby zespolone dwukomorowe ($\tau=72\%$) |

| | |
|--------------------------------|---|
| poziome żaluzje zewnętrzne | metalowe, malowane na kolor szary ($\rho=42\%$) |
| poręcze balustrad | metalowe, szcztokowane ($\rho=32\%$) |
| ławki | blaty drewniane, w kolorze dąb sonoma ($\rho=65\%$); nogi metalowe, malowane na kolor czarny ($\rho=4\%$) |
| krzesła | siedziska i oparcia z tkaniny w kolorze ciemnoszarym ($\rho=18\%$); nogi metalowe, malowane na kolor czarny ($\rho=4\%$) |
| system wentylacji mechanicznej | pokryty błyszczącą okładziną aluminiową ($\rho=90\%$) |
| tablice | metalowe, malowane na kolor biały ($\rho=85\%$); ramy metalowe niemalowane ($\rho=32\%$) |
| ramy opraw oświetleniowych | metalowe, malowane na kolor szary ($\rho=31\%$) |
| manipulatory naścienne | ramki w kolorze szarym ($\rho=31\%$); ekrany z tworzywa sztucznego w kolorze czarnym ($\rho=4\%$) |
| rozdzielnice, obudowy | w zależności od przeznaczenia: metalowe malowane na biało ($\rho=86\%$) lub czarno ($\rho=4\%$), z tworzywa sztucznego w kolorze białym ($\rho=86\%$), jasnoszarym ($\rho=59\%$) lub szarym ($\rho=36\%$), również z drzwiczkami z szarego szkła akrylowego ($\rho=26\%$) |
| głośniki | z tworzywa sztucznego w kolorze białym ($\rho=85\%$), maskownica z tkaniny w kolorze szarym ($\rho=31\%$) |
| monitory ekranowe | z tworzywa sztucznego w kolorze czarnym ($\rho=5\%$) |
| komputery PC, stojaki | metalowe, malowane na kolor czarny ($\rho=5\%$) |
| rzutniki | z tworzywa sztucznego w kolorze białym ($\rho=85\%$) |

Platformę obliczeniową stanowił komputer PC o specyfikacji podanej w tabeli 15, z oprogramowaniem DIALux w wersji 4.13. Do obliczeń przyjęto parametry podane w tabeli 16.

Tabela 15. Specyfikacja sprzętowa komputera PC używanego do obliczeń symulacyjnych.

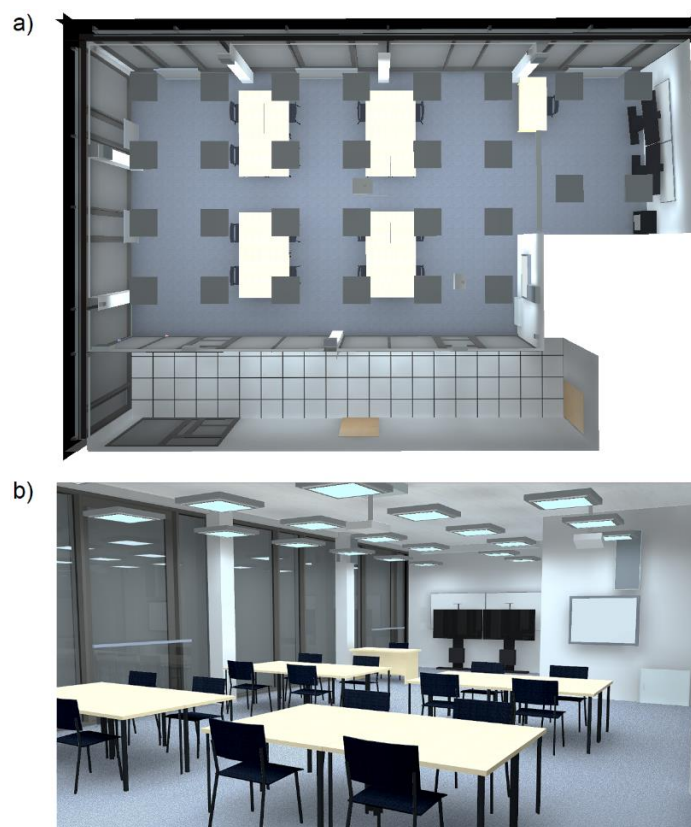
| | |
|-------------------|---------------------------------|
| procesor | Intel Core i7-5820K 3.30 GHz |
| płyta główna | Asrock X99 EXTREME3 |
| pamięć operacyjna | DDR3 2x8GB/1600 MHz |
| karta graficzna | nVidia GeForce GTX 750 2GB DDR5 |
| system operacyjny | Windows 10 Home |

Tabela 16. Parametry obliczeń przyjęte w programie DIALux 4.13.

| | |
|--|---|
| obliczane sceny świetlne | tylko oświetlenie elektryczne |
| tryb obliczeń | bardzo dokładne |
| łącznie oblicz obiekty | tak |
| oblicz także oprawy | tak |
| obliczanie obiektów dekoracyjnych w sposób uproszczony | tak |
| współczynnik zmniejszania, związany z metodą planu konserwacji | 1 (brak zanieczyszczeń obniżających strumień świetlny lamp) |

Z uwagi na ograniczenia metody, opracowywany model był poddawany okresowej ocenie zbieżności rezultatów symulacji z wynikami pomiarów uzyskanych w środowisku rzeczywistym. Ocena tą przeprowadzano na podstawie analizy regresji. Współczynnik kierunkowy prostej regresji a oraz wyraz wolny b wskazują na zbieżność wyników symulacji z danymi empirycznymi, natomiast współczynnik determinacji R^2 określa jakość dopasowania prostej regresji do danych.

Ponieważ proste modele pomieszczenia nie dawały zadowalających rezultatów (np. model uwzględniający jedynie kształt pomieszczenia oraz przeszklenie ścian: $a=0,91$, $b=142$, $R^2=0,92$), sporządzono szczegółowy model pomieszczenia uwzględniający elementy pomieszczenia lub jego wyposażenia zebrane w tabeli 14. Stolarka okienna i drzwiowa została zamodelowana w sposób przestrzenny. W celu uwzględnienia żaluzji zewnętrznych, w programie sztucznie rozszerzono wymiary otaczającego prostopadłościanu w taki sposób, aby objąć cały obrys modelowanego pomieszczenia wraz z żaluzjami znajdującymi się za płaszczyzną okien – tak powstałe wirtualne ściany pomieszczenia zostały zamodelowane jako okna o nieograniczonej przepuszczalności światła. Dokładność reprezentacji wymiarów pomieszczenia, podstawowych wymiarów obiektów oraz ich rozmieszczenia wynosiła do 1 cm.



Rysunek 51. Opracowany model komputerowy pomieszczenia badanego: a) widok z góry, b) wizualizacja komputerowa Ray-Trace, widok w kierunku zachodnim.

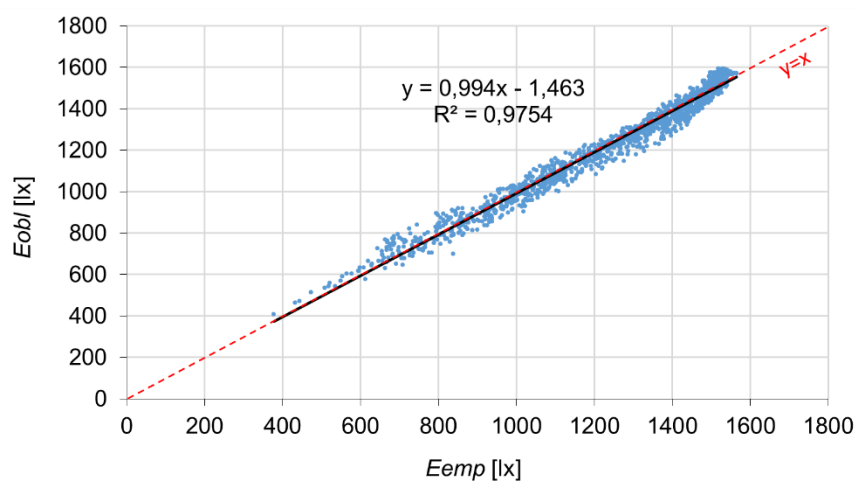
W celu skrócenia czasu obliczeń, biorąc pod uwagę znikomy wpływ na wyniki obliczeń rozkładu natężenia oświetlenia, w modelu zaniechano uwzględniania następujących elementów (w nawiasie podano wymiar skrócenia czasu obliczeń):

- obłego kształtu lameli żaluzji zewnętrznych – żaluzje w stanie zamkniętym zamodelowano jako metalowa płyta umieszczona w odpowiedniej odległości za przeszkleniem okien (ok. 45 min.),
- szyb zespolonych dwukomorowych – przeszklenie ściany zewnętrznej zamodelowano jako pojedyncza płyta szklana o adekwatnym współczynniku przepuszczania światła (ok. 4 min.),
- układu wentylacji zlokalizowanego pod sufitem powyżej poziomu opraw oświetleniowych (ok. 2 min.),
- elementów wyposażenia korytarza: klimakonwektora pod sufitem, rozdzielnic, balustrady (ok. 0,5 min.).

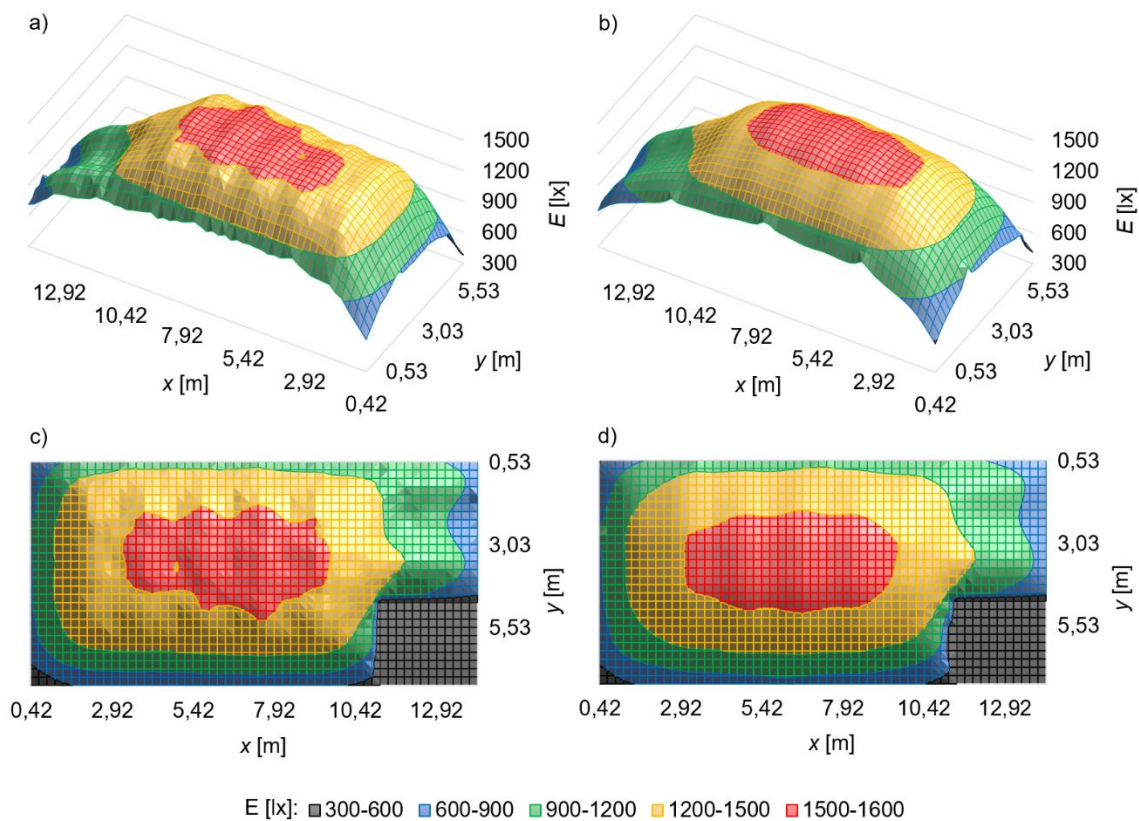
Opracowany model pokazano na rysunku 51.

Rezultaty walidacji modelu

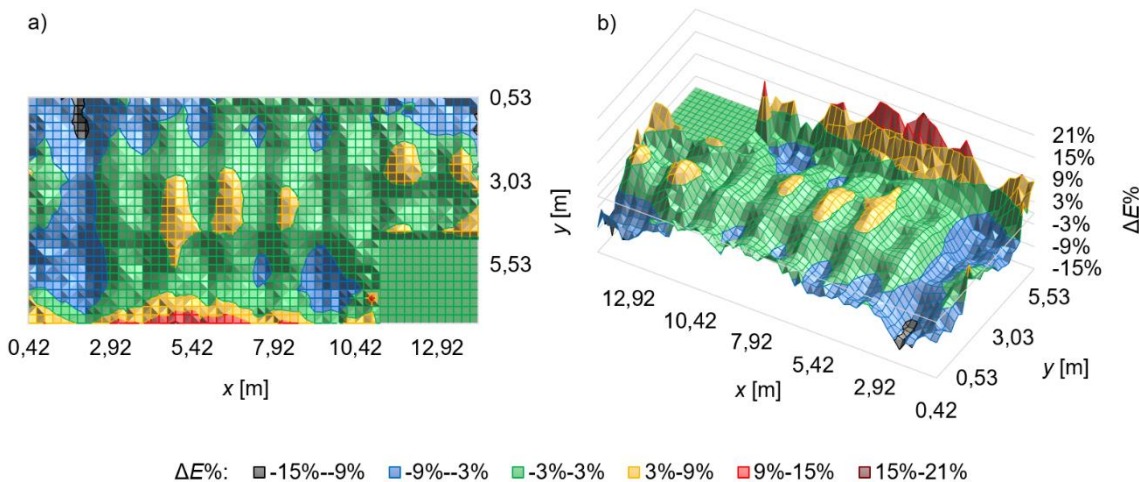
Wyniki oceny zbieżności rezultatów symulacji z danymi empirycznymi przedstawiono na rysunku 52. W modelu uzyskano bardzo dobre dopasowanie do danych empirycznych ($a=0,99$, $b=-1,46$, $R^2=0,98$), przy czasie obliczeń pojedynczej sceny świetlnej wynoszącym około 4 minut.



Rysunek 52. Wykres rozrzutu obrazujący zależność między natężeniami oświetlenia wyznaczonymi symulacyjnie z wykorzystaniem opracowanego modelu (E_{obl}), a zmierzonym w poszczególnych punktach pomieszczenia (E_{emp}) wraz z dopasowaną prostą regresji.



Rysunek 53. Rozkład natężenia oświetlenia wyznaczony: a) pomiarowo, b) symulacyjnie, c) pomiarowo – widok z góry, d) symulacyjnie – widok z góry.



Rysunek 54. Powierzchniowy rozkład różnic procentowych pomiędzy natężeniami oświetlenia wyznaczonymi symulacyjnie, a) i zmierzonymi w pomieszczeniu doświadczalnym: a) widok z góry, b) widok przestrzenny.

Porównanie rozkładu natężenia oświetlenia wyznaczonego metodą pomiarową oraz symulacji komputerowej w formie wykresów powierzchniowych zaprezentowano na rysunku 53. Lokalizację punktów pomiarowych i obliczeniowych opisano współrzędnymi x i y , odpowiednio dla dłuższego i krótszego boku pomieszczenia. Początek układu stanowi południowy narożnik pomieszczenia (patrz rysunek 18).

Przedstawione rozkłady są zbliżone, choć powierzchnia bazująca na danych empirycznych jest bardziej nieregularna, co wynika ze specyfiki metody pomiarowej. W obszarach zlokalizowanych pomiędzy oprawami oświetleniowymi, widoczne są lokalne podbicia wartości natężenia oświetlenia, wynikające z oddziaływania sąsiednich lamp. Efekt ten jest szczególnie widoczny na wykresie obrazującym dane empiryczne.

Rozkład różnic procentowych między natężeniami oświetlenia obliczonymi, a zmierzonymi pokazano na rysunku 54.

4.4. Metoda spersonalizowanego sterowania oświetleniem ogólnym, modelowanie matematyczne systemu oświetlenia

Rozważany jest system oświetlenia ogólnego otwartej przestrzeni biurowej, składający się z m opraw oświetleniowych oraz n stanowisk pracy. Natężenie oświetlenia wytwarzane na zajętych stanowiskach powinno odpowiadać personalnym preferencjom ich użytkowników. Realizacja tego typu lokalnego sterowania oświetleniem wymaga określenia:

- preferowanych natężeń oświetlenia na stanowiskach obecnych użytkowników,
- bieżącego stanu zajętości poszczególnych stanowisk pracy,
- zasad oświetlenia niezajętych stanowisk oraz pozostałych części pomieszczenia,
- zależności między nastawami lamp, a natężeniami oświetlenia wytwarzanymi na poszczególnych stanowiskach pracy.

Zakładamy, że preferowane poziomy oświetlenia stanowisk pracy oraz stan ich zajętości są znane. Informacje te mogą być pozyskane odpowiednio za pośrednictwem interfejsu komunikacji³⁵ oraz metod wykrywania zestawionych w tabeli 5 (w szczególności tych, których optymalnym zastosowaniem jest wykrywanie zajętości poszczególnych stanowisk pracy w biurach).

Rozważając oświetlenie pozostałych części pomieszczenia, należy zwrócić uwagę, że w zależności od bieżącego stanu zajętości stanowisk pracy, różne będą obszary zadania, bezpośredniego otoczenia oraz tła. Przyjęto zaproponowaną przez de Bakker, Aarts, Kort i Rosemanna [259] interpretację wytycznych normy EN 12464-1, która odnosi ogólne zasady wyznaczania tych obszarów do typowej organizacji przestrzennej biur typu *open space* [7]. Obszarem zadania są zatem biurka obecnych pracowników, obszarem bezpośredniego otoczenia inne niezajęte biurka z tej samej grupy biurek, a obszar tła to pozostała przestrzeń pomieszczenia. Koncepcję tę, na przykładzie rozważanego pomieszczenia zobrazowano na rysunku 55.

Korzystając z doświadczeń na temat akceptacji użytkowników dla różnicowania intensywności oświetlenia w różnych obszarach przestrzeni biurowej typu *open space*

³⁵ Patrz: rozdz. 2.4, s. 47.

[259], a także wytycznych normy PN-EN 12464-1:2012³⁶ przyjęto, że dla zapewnienia równomiernego rozkładu luminancji w polu widzenia natężenie oświetlenia na tak rozumianych obszarach bezpośredniego otoczenia powinno stanowić co najmniej 50% najwyższego preferowanego natężenia oświetlenia w danej grupie biur.



Rysunek 55. Koncepcja określania obszaru zadania, bezpośredniego otoczenia oraz tła podczas lokalnego sterowania oświetleniem w otwartej przestrzeni biurowej.

Proponuje się, aby podczas obecności osób dla zapewnienia oświetlenia obszaru tła, powierzchni ścian i sufitu oraz przestrzeni wnętrza wszystkie lampy w pomieszczeniu były włączone i pracowały przynajmniej z pewną minimalną nastawą d_{min} , która zapewni osiągnięcie następujących średnich natężeń oświetlenia według zaleceń normy PN-EN 12464-1:2012 [7]:

- 100 lx na obszarze tła (przyjęto wartość zalecaną dla natężenia oświetlenia 500 lx na obszarze zadania),
- 75 lx na ścianach,
- 50 lx na suficie.

Dla średniego cylindrycznego natężenia oświetlenia proponuje się przyjęcie kryterium 50 lx (wartość zalecana przez wspomnianą normę dla ogółu wnętrza). Jest to wartość niższa od zalecanej dla wnętrz biurowych, jednakże przyjęcie w tym miejscu kryterium 150 lx mogłoby spowodować – w zależności od charakterystyki systemu oświetleniowego – nadmierne ograniczenie możliwości regulacji natężenia oświetlenia w dół, a zatem uniemożliwić zaspokojenie potrzeb oświetleniowych użytkowników oczekujących względnie niskich natężeń oświetlenia. Podczas działania algorytmu, średnie cylindryczne natężenie oświetlenia wzrośnie na skutek pracy lampy z wyższymi współczynnikami ściemnienia dla zapewnienia zindywidualizowanych warunków oświetlenia stanowisk.

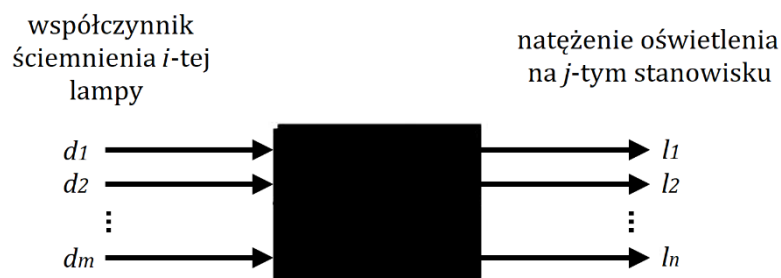
³⁶ Patrz: rozdz. 3.1, s. 82.

Informacja o wytwarzanych na stanowiskach natężeniach oświetlenia może być pozyskiwana na bieżąco przy użyciu sieci czujników lub z wykorzystaniem modelu matematycznego systemu oświetlenia.

W pierwszym przypadku, sterowanie następuje w układzie zamkniętym, a w przestrzeni pomieszczenia konieczne jest rozmieszczenie licznych czujników natężenia oświetlenia. Ich zastosowanie wiąże się z pewnymi ograniczeniami – podobnie jak przy automatycznym sterowaniu od światła dziennego w układzie zamkniętym³⁷. Podejście to jest przedmiotem szeregu prac [317, 355, 329, 173, 379, 185, 128].

W drugim przypadku, który jest przedmiotem rozważań w tej części pracy, sterowanie zachodzi w układzie otwartym. Na podstawie informacji o preferencjach użytkowników zajętych stanowisk, dobrany powinien być taki poziom ściemnienia poszczególnych lamp, aby przy znanej charakterystyce lamp i pomieszczenia (opisanej modelem matematycznym), otrzymać na wyjściu pożądany rozkład natężenia oświetlenia. Ponieważ w tym przypadku do działania systemu nie są konieczne czujniki światła jest on bardziej elastyczny, mniej kosztowny, a jego instalacja jest łatwiejsza (brak konieczności prowadzenia przewodów).

Na rysunku 56 przedstawiono system oświetlenia biura w postaci modelu „czarnej skrzynki” (*black box*). Zmienna wejściowa d_i ($0 < d_{min} \leq d_i \leq 1, i = 1, \dots, m$) stanowi współczynnik ściemnienia i -tej lampy ($d_i = 0$ oznacza, że i -ta lampa nie emituje światła, podczas gdy $d_i = 1$ oznacza pracę i -tej lampy z maksymalną jasnością), natomiast zmienna wyjściowa l_j ($j = 1, \dots, n$) wytwarzane natężenie oświetlenia na j -tym stanowisku.



Rysunek 56. System oświetlenia biura w postaci modelu „czarnej skrzynki”.

W proponowanym modelu zaniechano uwzględniania oddziaływania światła dziennego, ponieważ w przypadku biur typu *open space* jego penetracja w głąb pomieszczenia jest niewystarczająca dla zapewnienia odpowiedniego poziomu oświetlenia stanowisk pracy. Informacja o rozkładzie światła dziennego w pomieszczeniu może być natomiast wykorzystana w przyszłości do dalszej optymalizacji proponowanego w niniejszej pracy rozwiązania, przyczyniając się do

³⁷ Patrz: rozdz. 2.7, s. 69.

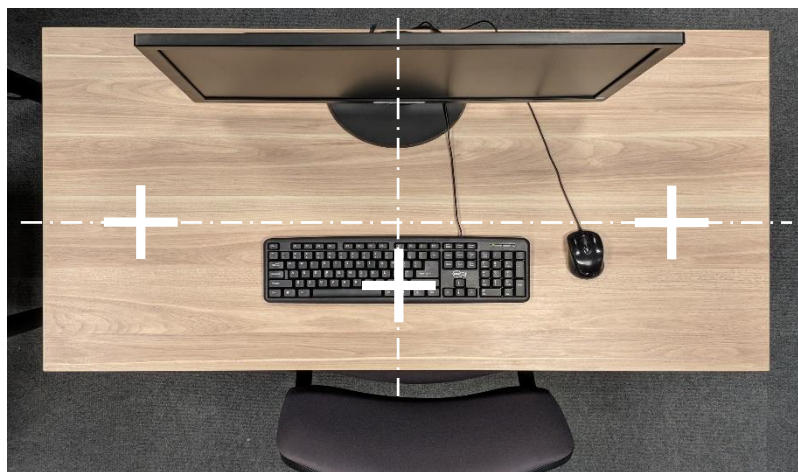
zwiększenia uzyskiwanych oszczędności energii. Zagadnienie to będzie przedmiotem dalszych prac badawczych autora.

Ponieważ temperatura w biurach zmienia się w niewielkim zakresie, można pominąć jej wpływ na emisję strumienia świetlnego lamp LED³⁸.

W celu określenia mapy zależności między współczynnikami ściemnienia opraw oświetleniowych, a zbiorem docelowych natężeń oświetlenia w przestrzeni pomieszczenia, opracowane zostały dwa modele matematyczne:

- model liniowy (metoda modelowania analitycznego),
- model nieliniowy (metoda modelowania z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych).

Rozważania oparto o pomieszczenie doświadczalne 4.02³⁹ zaaranżowane jako biuro typu *open space* (patrz rysunek 49), w którym zachodzą warunki: $m = 28$, $n = 17$ oraz $d_{min} = 0,1$, a zadawane współczynniki ściemnienia lamp mogą przyjmować wartości dyskretne z zakresu od 0,1 do 1 z krokiem 0,01. Natężenie oświetlenia na stanowiskach określano jako średnią z natężeń oświetlenia w ich trzech charakterystycznych punktach pokazanych na rysunku 57. Ze względu na rozsył światłości zastosowanych lamp, gdy na danym stanowisku jest wytworzone pewne natężenie oświetlenia, to na obszarze bezpośredniego otoczenia panuje natężenie oświetlenia spełniające przyjęte wymagania.



Rysunek 57. Lokalizacja punktów, w których określano natężenie oświetlenia na stanowisku pracy: w osi środkowej ławki 16 cm od jej przedniej krawędzi oraz po lewej i prawej stronie ławki 30 cm od jej przedniej krawędzi i 20 cm od jej bocznych krawędzi.

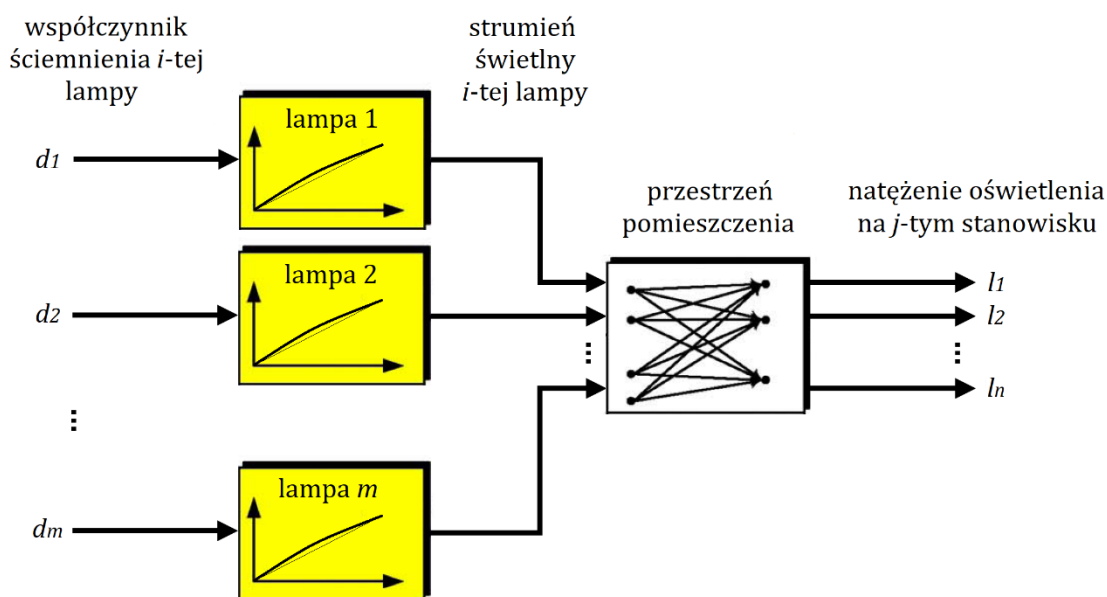
Model liniowy

Zależności występujące w rozważanym systemie oświetleniowym przedstawiono na rysunku 58. Z punktu widzenia teorii sterowania każda lampa stanowi nieliniowy układ jednowymiarowy (SISO – *single-input single-output*), którego

³⁸ Patrz: rozdz. 2.2, s. 34.

³⁹ Patrz: rozdz. 3.3, s. 87.

sygnałem wejściowym jest zadany współczynnik ściemnienia, natomiast sygnałem wyjściowym emitowany strumień świetlny. W przestrzeni pomieszczenia, oddziaływania poszczególnych opraw oświetleniowych na natężenie oświetlenia w danym jego punkcie podlegają zasadzie superpozycji [3, 172], w związku z czym przestrzeń pomieszczenia stanowi liniowy układ wielowymiarowy (MIMO – *multi-input multi-output*). Wobec tego cały system oświetleniowy, którego sygnałami wejściowymi są współczynniki ściemnienia lamp, natomiast sygnałami wyjściowymi są wynikowe natężenia oświetlenia na poszczególnych stanowiskach stanowi nieliniowy układ wielowymiarowy.



Rysunek 58. Zależności występujące w rozważanym systemie oświetleniowym.

Niech $a_i(j)$ oznacza natężenie oświetlenia na j -tym stanowisku ($j = 1, \dots, n$) wytworzone tylko przez i -tą lampę ($i = 1, \dots, m$) pracującą z pełną jasnością. Przy założeniu, że każda lampa ma liniową charakterystykę regulacji strumienia świetlnego⁴⁰ oraz korzystając z zasady superpozycji, wynikowe natężenie oświetlenia $l(j)$ wytworzone na j -tym stanowisku, będzie równe sumie składowych natężeń oświetlenia wywołanych strumieniem świetlnym każdej i -tej lampy:

$$l(j) = \sum_{i=1}^m a_i(j) \times d_i, j = 1, \dots, n \quad (4)$$

⁴⁰ Założenie o liniowości charakterystyki regulacji strumienia świetlnego dobrze sprawdza się w przypadku źródeł światła typu LED – P rozdz. 2.2, s. 37.

komputerowych. Sumując wszystkie elementy w j -tej kolumnie macierzy uzyskujemy informację o maksymalnym natężeniu oświetlenia możliwym do uzyskania na j -tym stanowisku przy wszystkich lampach pracujących z pełną jasnością. Elementami wektora \mathbf{d} są współczynniki ściemnienia lamp, natomiast elementami wektora \mathbf{l} są natężenia oświetlenia uzyskiwane na stanowiskach pracy.

Biorąc pod uwagę specyfikę rozważanego systemu oświetleniowego w pomieszczeniu 4.02⁴¹, jest on zatem opisany równaniem:

$$\mathbf{A}^T \times \mathbf{d} = \mathbf{l} \quad (7)$$

gdzie:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,17} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,17} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{28,1} & a_{28,2} & \cdots & a_{28,17} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_{28} \end{bmatrix}, d_1, d_2, \dots, d_{28} \in \langle 0, 1, 0, 11, 0, 12, \dots, 1 \rangle, \mathbf{l} = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_{17} \end{bmatrix}$$

Elementy macierzy \mathbf{A} (patrz załącznik B) wyznaczono przeprowadzając 28 symulacji komputerowych z wykorzystaniem dobranej modelu pomieszczenia⁴².

Model nieliniowy wykorzystujący sztuczne sieci neuronowe

Wykorzystanie sztucznej inteligencji (AI – *artificial intelligence*) w sterowaniu oświetleniem jest stosunkowo młodym zagadnieniem. W przestrzeniach biurowych jest ono rozważane od około dwóch dekad [199]. Jednym z narzędzi sztucznej inteligencji są sztuczne sieci neuronowe (ANN – *artificial neural networks*) inspirowane ludzkim układem nerwowym. W ostatnich latach, sieci te z powodzeniem stosuje się w większości gałęzi przemysłu i nauki, a ich rozwój nadal trwa. Sztuczne sieci neuronowe są stosowane między innymi w modelowaniu rzeczywistych zjawisk fizycznych, zwłaszcza takich, których nie udało się w pełni opisać matematycznie. Dzięki ich wykorzystaniu możliwe jest przeprowadzenie analiz typu „czarnej skrzynki” (*black box*) – problem można opisać na podstawie danych wejściowych i wyjściowych bez znajomości dokładnej natury związku między nimi [380, 381, 382, 383, 384, 58, 385].

Sztuczne sieci neuronowe wykorzystano do modelowania zjawisk występujących w rozważanym systemie oświetleniowym traktowanym jako „czarna skrzynka” (patrz rysunek 56). Na potrzeby rozważanego zagadnienia przyjęto dwuwarstwową, jednokierunkową (*feedforward*) strukturę sieci. Struktura ta

⁴¹ Patrz: rozdz. 3.3, s. 87.

⁴² Patrz: rozdz. 4.3, s. 111.

odpowiada pewnej ogólnej postaci równania matematycznego modelowanych zjawisk, określającego relację między argumentami wejściowymi sztucznej sieci neuronowej, a jej wartościami wyjściowymi:

$$l = f_{aktyw.}^{\{2\}} \left(\mathbf{W}^{\{2\}} \left(f_{aktyw.}^{\{1\}} \left(\mathbf{W}^{\{1\}} \times \mathbf{d} + \mathbf{B}^{\{1\}} \right) \right) + \mathbf{B}^{\{2\}} \right) \quad (8)$$

gdzie:

\mathbf{d} – wektor argumentów wejściowych sztucznej sieci neuronowej,

l – wektor wartości wyjściowych sztucznej sieci neuronowej,

$f_{aktyw.}^{\{1\}}$ – operator funkcji aktywacji warstwy ukrytej,

$\mathbf{W}^{\{1\}}$ – macierz wag argumentów wejściowych warstwy ukrytej,

$\mathbf{B}^{\{1\}}$ – macierz stałych współczynników warstwy ukrytej,

indeks $s^{\{1\}}$ – liczba neuronów w warstwie ukrytej,

$f_{aktyw.}^{\{2\}}$ – operator funkcji aktywacji warstwy wyjściowej,

$\mathbf{W}^{\{2\}}$ – macierz wag argumentów wejściowych warstwy wyjściowej,

$\mathbf{B}^{\{2\}}$ – macierz stałych współczynników warstwy wyjściowej,

$$l = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_{j-1} \\ l_j \\ l_{j+1} \\ \vdots \\ l_n \end{bmatrix}, \mathbf{d} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_{i-1} \\ d_i \\ d_{i+1} \\ \vdots \\ d_m \end{bmatrix}, \mathbf{B}^{\{1\}} = \begin{bmatrix} b_{1\{1\}} \\ b_{2\{1\}} \\ \vdots \\ b_{p-1\{1\}} \\ b_{p\{1\}} \\ b_{p+1\{1\}} \\ \vdots \\ b_{s\{1\}} \end{bmatrix}, \mathbf{B}^{\{2\}} = \begin{bmatrix} b_{1\{2\}} \\ b_{2\{2\}} \\ \vdots \\ b_{p-1\{2\}} \\ b_{p\{2\}} \\ b_{p+1\{2\}} \\ \vdots \\ b_{s\{1\}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{W}^{\{1\}} = \begin{bmatrix} w_{1,1}^{\{1\}} & w_{1,2}^{\{1\}} & & w_{1,i-1}^{\{1\}} & w_{1,i}^{\{1\}} & w_{1,i+1}^{\{1\}} & & w_{1,m}^{\{1\}} \\ w_{2,1}^{\{1\}} & w_{2,2}^{\{1\}} & & w_{2,i-1}^{\{1\}} & w_{2,i}^{\{1\}} & w_{2,i+1}^{\{1\}} & & w_{2,m}^{\{1\}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{p-1,1}^{\{1\}} & w_{p-1,2}^{\{1\}} & \dots & w_{p-1,i-1}^{\{1\}} & w_{p-1,i}^{\{1\}} & w_{p-1,i+1}^{\{1\}} & \dots & w_{p-1,m}^{\{1\}} \\ w_{p,1}^{\{1\}} & w_{p,2}^{\{1\}} & & w_{p,i-1}^{\{1\}} & w_{p,i}^{\{1\}} & w_{p,i+1}^{\{1\}} & & w_{p,m}^{\{1\}} \\ w_{p+1,1}^{\{1\}} & w_{p+1,2}^{\{1\}} & & w_{p+1,i-1}^{\{1\}} & w_{p+1,i}^{\{1\}} & w_{p+1,i+1}^{\{1\}} & & w_{p+1,m}^{\{1\}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{s^{\{1\}},1}^{\{1\}} & w_{s^{\{1\}},2}^{\{1\}} & & w_{s^{\{1\}},i-1}^{\{1\}} & w_{s^{\{1\}},i}^{\{1\}} & w_{s^{\{1\}},i+1}^{\{1\}} & & w_{s^{\{1\}},m}^{\{1\}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{W}^{\{2\}} = \begin{bmatrix}
w_{1,1}^{\{2\}} & w_{1,2}^{\{2\}} & & w_{1,p-1}^{\{2\}} & w_{1,p}^{\{2\}} & w_{1,p+1}^{\{2\}} & & w_{1,s}^{\{2\}} \\
w_{2,1}^{\{2\}} & w_{2,2}^{\{2\}} & & w_{2,p-1}^{\{2\}} & w_{2,p}^{\{2\}} & w_{2,p+1}^{\{2\}} & & w_{2,s}^{\{2\}} \\
\vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\
w_{j-1,1}^{\{2\}} & w_{j-1,2}^{\{2\}} & \dots & w_{j-1,p-1}^{\{2\}} & w_{j-1,p}^{\{2\}} & w_{j-1,p+1}^{\{2\}} & \dots & w_{j-1,s}^{\{2\}} \\
w_{j,1}^{\{2\}} & w_{j,2}^{\{2\}} & & w_{j,p-1}^{\{2\}} & w_{j,p}^{\{2\}} & w_{j,p+1}^{\{2\}} & & w_{j,s}^{\{2\}} \\
w_{j+1,1}^{\{2\}} & w_{j+1,2}^{\{2\}} & & w_{j+1,p-1}^{\{2\}} & w_{j+1,p}^{\{2\}} & w_{j+1,p+1}^{\{2\}} & & w_{j+1,s}^{\{2\}} \\
\vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\
w_{n,1}^{\{2\}} & w_{n,2}^{\{2\}} & & w_{n,p-1}^{\{2\}} & w_{n,p}^{\{2\}} & w_{n,p+1}^{\{2\}} & & w_{n,s}^{\{2\}}
\end{bmatrix}$$

Współczynniki tego równania zostaną określone w procesie uczenia sieci. W tym celu zebrano i przygotowano zbiór danych uczących, stanowiących wzór prawidłowego zachowania sieci neuronowej – wejść i odpowiadających im docelowych wyjść sieci. Dane te stanowiło 130 przypadków ustalonych stanów pracy rozważanego systemu, w postaci współczynników ściemnienia 28 lamp oraz odpowiadających im 17 wynikowych natężeń oświetlenia. Dane uporządkowano w postaci dwóch macierzy. Nastawy lamp zebrano w postaci macierzy argumentów uczących \mathbf{D}_{ucz} (argumentów wejściowych sieci przydzielonych do procesu uczenia) wymiaru 28x130, natomiast odpowiadające im wynikowe natężenia oświetlenia zestawiono w postaci macierzy wartości uczących \mathbf{L}_{ucz} (wartości wyjściowych sieci przydzielonych do procesu uczenia) wymiaru 17x130. Nastawy lamp dla 120 przypadków zostały wygenerowane losowo, natomiast pozostałe 10 przypadków opisywało wybrane stany pracy systemu – wszystkie lampy włączone z tą samą nastawą (od 0,1 do 1 z krokiem 0,1). Wynikowe natężenia oświetlenia dla każdego stanu pracy lamp mogą być pozyskane metodą pomiarową lub symulacji komputerowych. Wybrano wariant drugi korzystając z opracowanego modelu pomieszczenia⁴³.

Następnie, z wykorzystaniem programu Matlab w wersji R2015A zaprojektowano przyjętą strukturę sztucznej sieci neuronowej (patrz rysunek 59). Struktura ta posiada 19 neuronów w warstwie ukrytej oraz 17 neuronów w warstwie wyjściowej. Liczba neuronów w warstwie wyjściowej odpowiada liczbie wyjść sieci. Liczbę neuronów w warstwie ukrytej przyjęto doświadczalnie z zakresu od 2 do 40, według kryterium najwyższej osiągniętej wartości współczynnika korelacji liniowej Pearsona obliczonego dla wszystkich danych przypisanych do procesu uczenia. Dla warstwy ukrytej zaimplementowano tangensoidalny operator funkcji aktywacji (*Tan-Sigmoid*):

$$f_{aktyw.}^{\{1\}}(arg^{\{1\}}) = \frac{2}{1+e^{-2 \times arg^{\{1\}}}} - 1 \quad (9)$$

gdzie:

$$arg^{\{1\}} = \mathbf{W}^{\{1\}} \times \mathbf{d} + \mathbf{B}^{\{1\}}$$

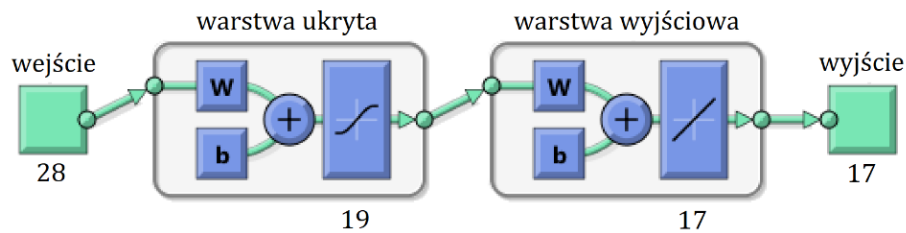
⁴³ Patrz: rozdz. 4.3, s. 111.

Wybór nieliniowego operatora wynikał z występowania nieliniowości w rozważanym zadaniu. Dla neuronów warstwy wyjściowej zadano liniowe funkcje aktywacji:

$$f_{aktyw.}^{\{2\}}(arg^{\{2\}}) = arg^{\{2\}} \quad (10)$$

gdzie:

$$arg^{\{2\}} = W^{\{2\}} \left(f_{aktyw.}^{\{1\}}(W^{\{1\}} \times d + B^{\{1\}}) \right) + B^{\{2\}}$$



Rysunek 59. Struktura sztucznej sieci neuronowej przyjęta do modelowania systemu oświetleniowego; W – blok wag połączeń między neuronami, b – blok stałego współczynnika.

Na potrzeby procesu uczenia sieci neuronowej (z nauczycielem) dane uczące przydzielono w sposób losowy do trzech zbiorów w proporcji 70%, 15% oraz 15% odpowiednio dla etapu treningu, walidacji oraz testów. Proces ten przeprowadzono przy wykorzystaniu algorytmu treningu Levenberg-Marquardt oraz przy przyjętych parametrach uczenia przedstawionych w tabeli 17. Jako funkcję wydajności uczenia sieci przyjęto błąd średniokwadratowy (MSE – *mean squared error*) [381]:

$$MSE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (l_{ucz_i} - l_i)^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (e_i)^2 \quad (11)$$

gdzie:

l_{ucz_i} – wartość elementu macierzy L_{ucz} przypisana do jednego z etapów procesu uczenia sieci (treningu, walidacji albo testu),

l_i – wartość otrzymana na wyjściu sieci, przy zadaniu danych wejściowych z macierzy D_{ucz} , które odpowiadają elementowi wskazującemu wartość l_{ucz_i}

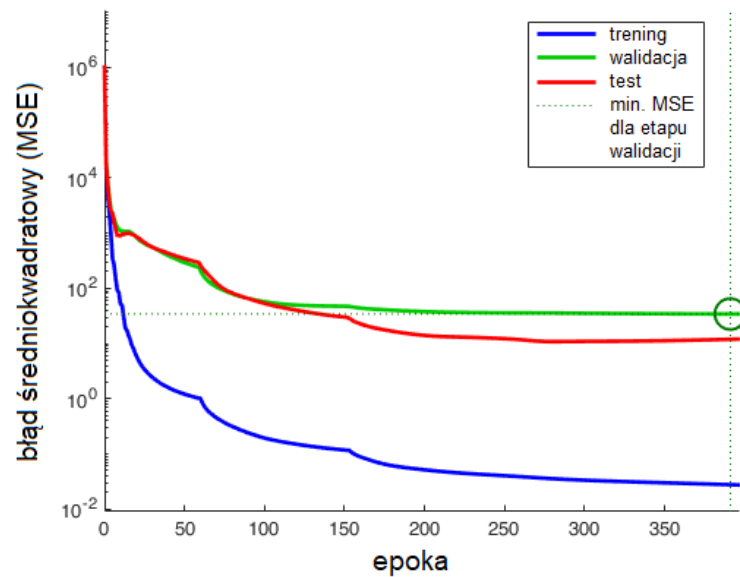
m – liczba wartości danej zmiennej z macierzy L_{ucz} przypisana do jednego z etapów procesu uczenia sieci.

Tabela 17. Parametry przyjęte dla procesu uczenia sieci neuronowej

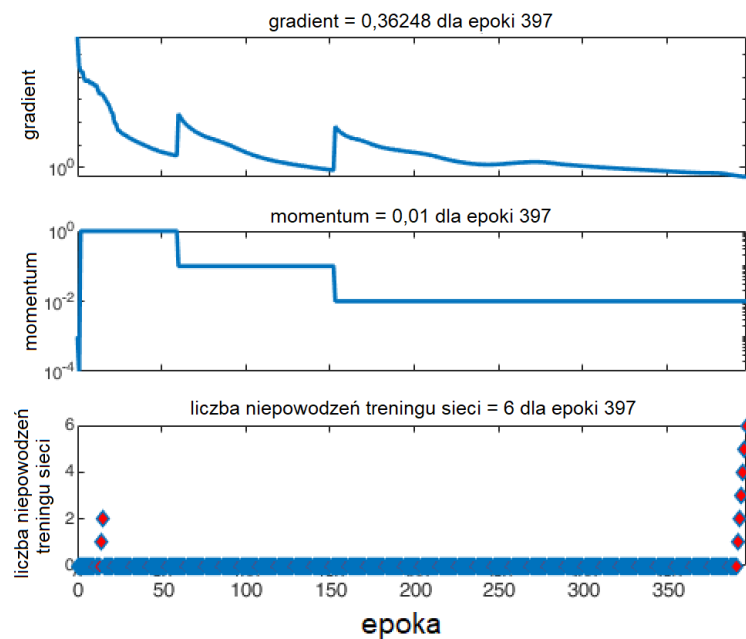
| parametr uczenia | zadana wartość |
|---|----------------|
| maksymalna liczba epok uczenia | 1000 |
| docelowa wartość funkcji wydajności w procesie uczenia | 0 |
| współczynnik szybkości uczenia sieci | 0,01 |
| maksymalna liczba następujących po sobie niepowodzeń treningu sieci | 6 |
| momentum | 0,9 |
| minimalny gradient funkcji wydajności | 10^{-10} |
| maksymalny czas treningu sieci | ∞ |

Proces uczenia sieci neuronowej, polega na celowej modyfikacji jej współczynników przy użyciu algorytmu uczenia, w celu minimalizacji błędu popełnianego przez sieć. Nauka przebiega w następujących po sobie etapach treningu, walidacji oraz testów, które są powtarzane aż do osiągnięcia docelowej wartości funkcji wydajności lub zadanej granicznej wartości parametrów uczenia (patrz tabela 17). Każda iteracja jest nazywana epoką i stanowi jeden pełny cykl uczenia złożony z etapów treningu, walidacji i testu. Pozytywne zakończenie procesu uczenia polega na osiągnięciu docelowej wartości funkcji wydajności lub maksymalnej liczby następujących po sobie niepowodzeń treningu sieci. W efekcie w „pamięci” sieci zostaje wygenerowana struktura danych obrazująca zależności występujące w rozważanym systemie. Osiągnięcie zerowej wartości funkcji wydajności, uznawane jest za idealne z punktu widzenia obliczeń sieci, gdyż oznacza, że argumenty z macierzy argumentów uczących \mathbf{D}_{ucz} są jednoznacznie i bezbłędnie przypisywane wartościom zawartym w macierzy wartości uczących \mathbf{L}_{ucz} .

Po przeprowadzeniu procesu uczenia przystąpiono do oceny poprawności jego przebiegu. Na rysunku 60 przedstawiono przebiegi wartości funkcji wydajności w dziedzinie epoki uczenia, obliczone dla każdego z etapów procesu uczenia sieci. Z kolei na rysunku 61 pokazano zbiór wykresów parametrów nauki sieci neuronowej w dziedzinie epoki. Z przedstawionych wykresów wynika, że proces uczenia sieci odbywał się prawidłowo i został zakończony po osiągnięciu zadanej maksymalnej liczby sześciu następujących po sobie niepowodzeń treningu. Można zaobserwować, że wartości funkcji wydajności dla etapu walidacji (wartość błędu średniokwadratowego sieci) malała aż do 391 epoki, osiągając minimum równe 34,1794 dla nauczonej sieci. Od tego momentu, w celu potwierdzenia przypuszczalnego lokalnego minimum funkcji wydajności, nauka była kontynuowana jeszcze przez kolejne 6 epok. Jednakże, ponieważ trend wartości rozważanej funkcji zmienił się na rosnący, spowodowało to nieustanne występowanie niepowodzeń treningu, aż do pozytywnego zakończenia procesu uczenia sieci.



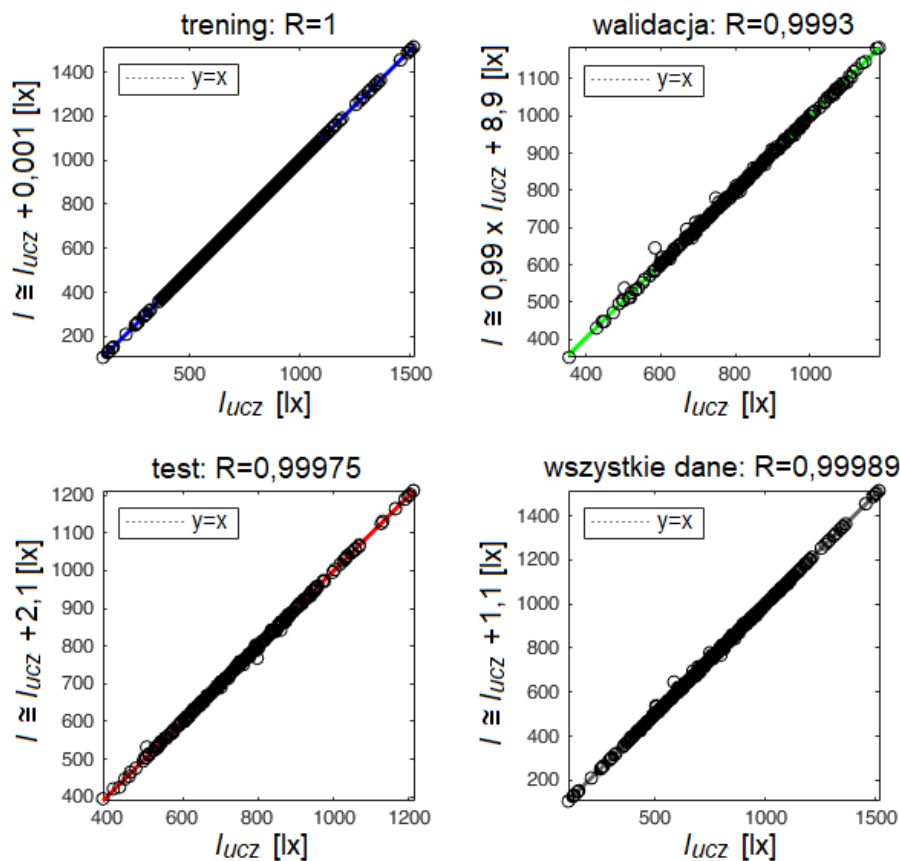
Rysunek 60. Przebiegi wartości funkcji wydajności w dziedzinie epoki uczenia obliczone dla etapów treningu, walidacji oraz testowania sieci.



Rysunek 61. Przebiegi parametrów uczenia sztucznej sieci neuronowej w dziedzinie epoki.

Następnie przystąpiono do oceny zbieżności wartości wyjściowych nauczonej sieci neuronowej z danymi wzorcowymi przypisanymi do procesu uczenia. Oceny tej dokonuje się na podstawie analizy regresji oraz błędów popełnianych przez sieć [381, 385]. Z uwagi na przyjętą liniową funkcję aktywacji warstwy wyjściowej sieci przeprowadzono analizę regresji liniowej. Na rysunku 62 przedstawiono jej wyniki dla danych przedzielonych do etapów treningu, walidacji i testów oraz łącznie dla wszystkich danych biorących udział w procesie uczenia, wraz z obliczonymi wartościami współczynnika korelacji liniowej Pearsona (R). Na podstawie obliczonych współczynników R można stwierdzić, że wynikowe natężenia oświetlenia uzyskiwane na wyjściu sieci dla zadanych nastaw lamp (argumentów wejściowych sieci

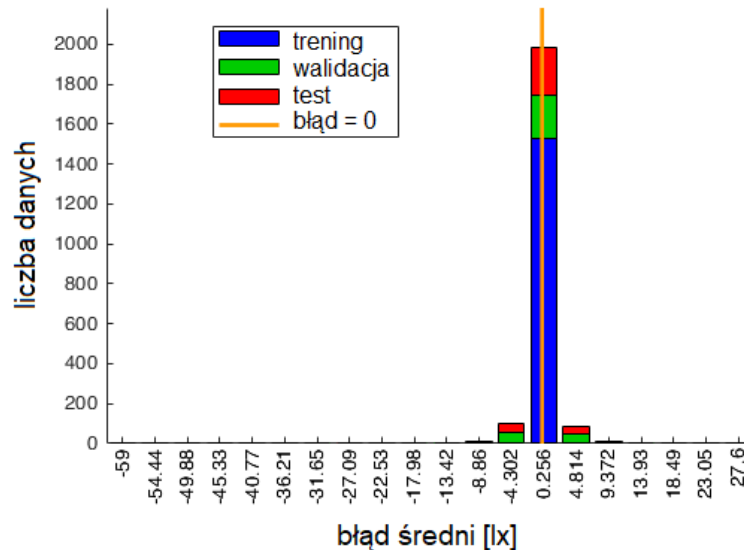
przydzielonych do procesu uczenia) są bardzo silnie skorelowane z referencyjnymi natężeniami oświetlenia (wartościami wyjściowymi sieci przydzielonymi do procesu uczenia). Ponieważ wartości R uzyskane dla etapów treningu, walidacji i testów nie różnią się o więcej niż 20% [381] od wartości R obliczonej dla wszystkich danych uczących, można stwierdzić, że dane dla poszczególnych etapów uczenia zostały przydzielone prawidłowo. Następnie, na podstawie współczynnika R, wyznaczono współczynnik determinacji R^2 , który stanowi wskaźnik jakości dopasowania modelu do danych uczących. Przedstawione w tabeli 18 wartości, różniące się nie więcej niż o 0,0014 od przypadku idealnego ($R^2=1$) potwierdzają, że uzyskano bardzo dobrą jakość dopasowania modelu do tych danych uczących, a także do danych przypisanych do każdego z etapów uczenia z osobna. Na rysunku 63 przedstawiono histogram błędu nauczonej sieci neuronowej dla etapów treningu, walidacji i testów. Można zauważyć, że błąd bezwzględny popełniany przez sieć dla zdecydowanej większości obliczanych natężeń oświetlenia nie przekracza 7 lx.



Rysunek 62. Zbiór wykresów regresji liniowej wykonanych dla danych przydzielonych do etapów treningu, walidacji i testów nauczonej sieci neuronowej dla oraz dla wszystkich danych uczących, wraz z wyznaczonymi współczynnikami korelacji liniowej Pearsona (R); l – wynikowe natężenia oświetlenia uzyskiwane na wyjściu sieci dla zadanych nastaw lamp (argumentów wejściowych sieci przydzielonych do procesu uczenia); l_{ucz} – referencyjne natężenia oświetlenia (wartości wyjściowe sieci przydzielone do procesu uczenia).

Tabela 18. Wartości współczynnika determinacji R^2 dla danych przypisanych do poszczególnych etapów procesu uczenia sieci, a także dla wszystkich danych uczących.

| zbiór danych | R^2 |
|----------------|---------|
| trening | 0,99999 |
| walidacja | 0,9986 |
| test | 0,9995 |
| wszystkie dane | 0,99978 |



Rysunek 63. Histogram błędów sieci neuronowej.

Podsumowując uzyskane rezultaty można stwierdzić, że struktura sztucznej sieci neuronowej została zaprojektowana poprawnie oraz zastosowano prawidłową metodę uczenia. Proces nauki został pozytywnie zakończony i uzyskano bardzo wysoką zbieżność rezultatów sieci z danymi wzorcowymi przydzielonymi do procesu uczenia (wynikowe natężenia oświetlenia otrzymywane z sieci neuronowej są w bardzo wysokim stopniu zbieżne z referencyjnymi natężeniami oświetlenia dla tych samych nastaw lamp). Tym samym sieć neuronowa została nauczona reprezentowania rzeczywistego systemu oświetleniowego i może być z powodzeniem wykorzystywana jako jego model w procesie sterowania. Podając na wejście uzyskanego modelu opisanego równaniem (12) wektor \mathbf{d} zawierający współczynniki ściemnienia 28 lamp, na wyjściu otrzymuje się wektor \mathbf{l} zawierający 17 wynikowych natężeń oświetlenia.

$$\mathbf{l} = \mathbf{f}^{\{2\}}_{\text{aktyw.}} \left(\mathbf{W}_{17 \times 19}^{\{2\}} \left(\mathbf{f}^{\{1\}}_{\text{aktyw.}} \left(\mathbf{W}_{19 \times 28}^{\{1\}} \times \mathbf{d} + \mathbf{B}_{19 \times 1}^{\{1\}} \right) \right) + \mathbf{B}_{17 \times 1}^{\{2\}} \right) \quad (12)$$

Szczegóły równania (12) zawarto w załączniku C (17).

Wnioski wynikające z przeprowadzonego modelowania matematycznego

Zarówno metoda modelowania analitycznego jak i metoda wykorzystująca sztuczne sieci neuronowe mogą być uniwersalnie stosowane we wszystkich pomieszczeniach wyposażonych w indywidualnie sterowane lampy LED. Opracowane modele odwzorowują obiekt sterowany i mogą być wykorzystane w procesie sterowania w układzie otwartym, pod warunkiem niezmienności charakterystyki świetlnej pomieszczenia oraz własności samego systemu oświetleniowego. Gdy wystąpią znaczące zmiany, konieczna jest aktualizacja modeli. Dla modelu liniowego polega ona na ponownym wyznaczeniu elementów macierzy A^{44} , natomiast w przypadku modelu sieciowego aktualizacja polega na ponownym przygotowaniu zbioru danych uczących oraz przeprowadzeniu procesu uczenia sieci.

W przypadku liczniejszych opraw oświetleniowych lub stanowisk pracy, obie metody wymagają większego nakładu pracy na pozyskanie danych dla opracowania modeli. Zaprojektowanie modelu ANN będzie wymagało także przygotowania większej liczby przykładów prawidłowego zachowania sieci.

4.5. Optymalizacja problemu lokalnego sterowania oświetleniem przy minimalnym zużyciu energii

Na ogół pożądane natężenia oświetlenia w różnych punktach pomieszczenia można uzyskać na wiele sposobów. Na przykład to samo natężenie oświetlenia na biurku może być uzyskane za pośrednictwem lampy umieszczonej bezpośrednio nad nim i pracującej przy pewnym współczynniku ściemnienia, bądź dzięki lampie umieszczonej w pewnej odległości od biurka, lecz pracującej z wyższym współczynnikiem ściemnienia. Należy jednak mieć na uwadze, że w drugim przypadku ten sam efekt będzie osiągnięty przy wyższym nakładzie energii. Wreszcie, to samo natężenie oświetlenia może być wytworzone przy współudziale kilku lamp.

W tym miejscu warto zauważyć, że o ile decyzja, które lampy mają wytwarzać oświetlenie stanowisk jest istotna ze względów energetycznych, to z punktu widzenia użytkowników nie ma ona znaczenia. Jak pokazują wyniki badań, użytkownicy nie zauważają różnicy między oświetleniem stanowiska wytwarzanym przez jedną lampę, a tym będącym wynikiem oddziaływania kilku sąsiednich lamp [277].

Mając wyznaczoną mapę zależności między współczynnikami ściemnienia lamp, a natężeniami oświetlenia wytwarzanymi w poszczególnych obszarach pomieszczenia,

⁴⁴ W przypadku zmian dotyczących lamp oraz stanowisk pracy wystarczająca może być aktualizacja jedynie części elementów macierzy A . Przykładowo, w przypadku przesunięcia i -tej oprawy oświetleniowej lub zmiany jej typu wystarczy na nowo określić jej oddziaływanie na wszystkie stanowiska (zmiana i -tego wiersza macierzy). Z kolei w przypadku przesunięcia stanowiska z dużym prawdopodobieństwem można przyjąć, że zmiana ta nie wywoła znaczącej zmiany natężeń oświetlenia w pozostałych częściach pomieszczenia i wystracające będzie zaktualizowanie oddziaływania wszystkich lamp na to jedno stanowisko (zmiana j -tej kolumny macierzy).

można przystąpić do optymalizacji problemu lokalnego sterowania oświetleniem. Jej celem jest minimalizacja zużycia energii przez instalację oświetleniową przy ograniczeniach wynikających z bieżących potrzeb oświetleniowych obecnych w pomieszczeniu użytkowników. Funkcją celu stanowi zatem całościowa moc z jaką pracuje system oświetleniowy. Przy założeniu, że każda i -ta lampa charakteryzuje się liniową zależnością mocy w funkcji współczynnika ściemnienia d_i oraz przy pełnej jasności pracuje z mocą P_i ⁴⁵, łączna moc z jaką pracują wszystkie lampy wynosi:

$$P_{\text{oświetlenia}} = \sum_{i=1}^m P_i \times d_i \quad (13)$$

Moc ta jest funkcją zmiennych decyzyjnych d_1, \dots, d_m i powinna być minimalna. Jednocześnie jest ona ograniczona od dołu ze względu na zadane natężenia oświetlenia, które mają być wytworzone na poszczególnych stanowiskach.

Optymalizacja sterowania z wykorzystaniem modelu liniowego

Przyjmując, że moce lamp pracujących z pełną jasnością są równe, zadanie optymalizacji można sformułować jako:

$$\text{zminimalizować } f(d_1, \dots, d_m) = \sum_{i=1}^m d_i$$

takie, że:

$$\mathbf{A}^T \times \mathbf{d} \geq \mathbf{l}$$

gdzie:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1} & a_{m,2} & \dots & a_{m,n} \end{bmatrix}, \mathbf{d} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_m \end{bmatrix}, d_{\min} \leq d_1, d_2, \dots, d_m \leq 1, \mathbf{l} = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

Elementami wektora \mathbf{l} są oczekiwane natężenia oświetlenia na stanowiskach pracy, które wynikają z preferencji obecnych użytkowników. Ponieważ zarówno funkcja celu, jak i warunki ograniczające mają postać liniową, zatem sformułowany problem jest zadaniem programowania liniowego.

Biorąc pod uwagę charakterystykę systemu oświetleniowego rozważanego pomieszczenia 4.02⁴⁶, przy założeniu sterowania lamp sygnałem ciągłym problem ten przyjmuje postać:

$$\text{zminimalizować } f(d_1, \dots, d_{28}) = \sum_{i=1}^{28} d_i$$

takie, że:

$$\mathbf{A}^T \times \mathbf{d} \geq \mathbf{l}$$

⁴⁵ Moc P_i jest stałą zależną od typu zastosowanych w pomieszczeniu lamp.

⁴⁶ Patrz: rozdz. 3.3, s. 87.

gdzie:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,17} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,17} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{28,1} & a_{28,2} & \cdots & a_{28,17} \end{bmatrix}, \mathbf{d} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_{28} \end{bmatrix}, 0,1 \leq d_1, d_2, \dots, d_{28} \leq 1, \mathbf{l} = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_{17} \end{bmatrix} \quad (15)$$

W celu rozwiązania problemu wykorzystano program Matlab w wersji R2015A (patrz załącznik D). Ponieważ w rozważanym pomieszczeniu współczynniki ściemnienia przyjmują wartości dyskretne ($d_1, d_2, \dots, d_{28} \in \{0,1,0,11,0,12, \dots, 1\}$), rozwiązania są zaokrąglane do najbliższych części setnych. Z uwagi na wysoką rozdzielczość dyskretyzacji współczynników, otrzymany wynik pozostaje bardzo bliski rozwiązaniu optymalnemu, a także nie ma istotnego wpływu na wytwarzany rozkład natężenia oświetlenia.

Optymalizacja sterowania z wykorzystaniem modelu ANN

Związek między wektorem współczynników ściemnienia lamp \mathbf{d} oraz wektorem wytwarzanych na stanowiskach natężeń oświetlenia \mathbf{l} (patrz rysunek 56) jest opisany za pomocą opracowanego modelu ANN wykorzystującego sztuczne sieci neuronowe. Minimalizacji podlega całkowita moc systemu opisana wzorem (13). Zatem, biorąc pod uwagę charakterystykę systemu oświetleniowego pomieszczenia 4.02⁴⁷ i założenie o ciągłości sygnału sterującego lamp zadanie optymalizacji można sformułować jako:

$$\text{zminimalizować } f(d_1, \dots, d_{28}) = \sum_{i=1}^{28} d_i$$

takie, że:

$$ANN(\mathbf{d}) \geq \mathbf{l}$$

gdzie:

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_{28} \end{bmatrix}, 0,1 \leq d_1, d_2, \dots, d_{28} \leq 1, \mathbf{l} = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_{17} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Ponieważ warunki ograniczające mają postać nieliniową, zatem sformułowany problem jest zadaniem optymalizacji nieliniowej z ograniczeniami. W celu rozwiązania problemu wykorzystano program Matlab w wersji R2015A (patrz załącznik E). Podobnie jak w przypadku zadania optymalizacji (15), ze względów praktycznych rozwiązania zaokrąglane są do najbliższych części setnych.

⁴⁷ Patrz: rozdz. 3.3, s. 87.

Wnioski wynikające z przeprowadzonej optymalizacji

Optymalizacja problemu lokalnego sterowania oświetleniem polega na wyznaczeniu takich współczynników ściemnienia poszczególnych lamp (na podstawie opracowanych modeli matematycznych systemu oświetleniowego), które dla danego stanu zajętości stanowisk pracy i bieżących potrzeb oświetleniowych użytkowników, zapewnią minimalne zużycie energii przez instalację oświetleniową. Przykłady optymalnych rozwiązań dla wybranych scenariuszy pracy systemu oświetleniowego pokazano w dalszej części pracy w rozdziale 4.6.

Ograniczeniem obu podejść optymalizacyjnych jest założenie o liniowości poboru energii w funkcji współczynnika ściemnienia lamp. W przypadku modelu liniowego przyjęto ponadto uproszczenie w postaci idealnej charakterystyki regulacji strumienia świetlnego (liniowa zależność współczynnika ściemnienia i emitowanego strumienia świetlnego). Uproszczenia te w zależności od charakterystyki lamp mogą prowadzić do uzyskania rezultatów nieco różniących się od optymalnych.

Wyzwaniem dla obu metod jest także wzrost stopnia skomplikowania obliczeń wraz z rosnącą liczbą opraw oświetleniowych i stanowisk pracy.

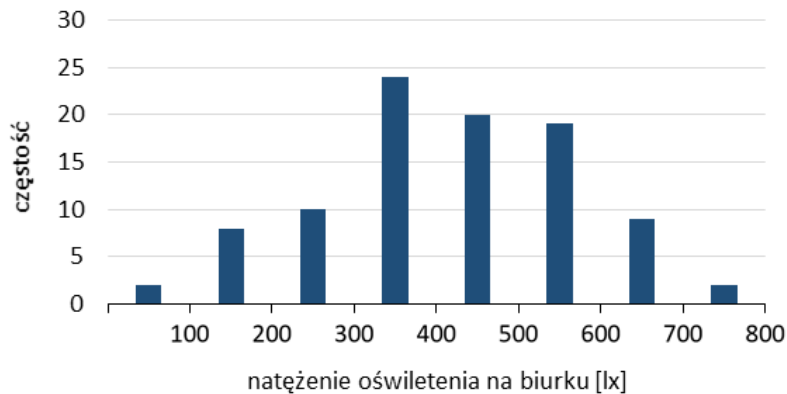
4.6. Analiza możliwości poprawy efektywności energetycznej oświetlenia z wykorzystaniem metody spersonalizowanego sterowania

W celu oceny możliwości poprawy efektywności energetycznej oświetlenia przystąpiono do analizy wpływu metody spersonalizowanego sterowania oświetleniem na obniżenie zużycia energii elektrycznej w stosunku do tradycyjnej instalacji oświetleniowej.

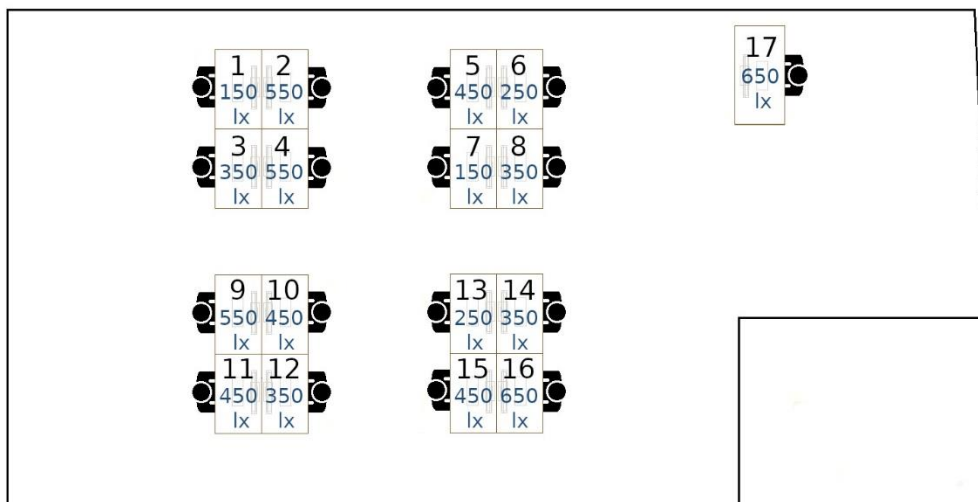
Na początku należało przyjąć pewien schemat użytkowania przestrzeni obejmujący preferencje oświetleniowe użytkowników oraz sposób ich rozmieszczenia w pomieszczeniu. Ponieważ przyjęte preferencje będą w bezpośredni sposób rzutowały na uzyskiwane oszczędności energii, zdecydowano się przyjąć zróżnicowane potrzeby oświetleniowe na stanowiskach, w oparciu o wyniki badania przeprowadzonego z udziałem 94 osób w biurach wyposażonych w boksy [346]⁴⁸. Jego uczestnicy mogli wyregulować oświetlenie własnego stanowiska według indywidualnych upodobań. Histogram preferowanych natężeń oświetlenia na biurku przedstawiono na rysunku 64. Z wykresu wynika, że 68,09% osób preferowało natężenia oświetlenia niższe niż 500 lx. Do dalszej analizy, jako preferowane natężenia oświetlenia przyjęto środkowe wartości przedziałów klasowych, a pokazany rozkład

⁴⁸ Wskazane źródło przyjęto ze względu na szczegółowość raportowanych danych o natężeniach oświetlenia preferowanych przez uczestników badania. Ponadto przyjmując pewien zakres tolerancji ludzi dla zmian natężenia oświetlenia (patrz: rozdz. 3.2, s. 87) wyniki te w przybliżeniu odpowiadały ocenie poziomu oświetlenia stanowisk uzyskanej na podstawie badań własnych (patrz: rozdz. 3.5, s. 97).

preferencji przełożono w sposób możliwie zbliżony na 17 użytkowników rozważanego pomieszczenia. Następnie użytkowników w sposób losowy przyporządkowano do stanowisk. Preferencje oświetleniowe na poszczególnych stanowiskach oraz ich numerację pokazano na rysunku 65.



Rysunek 64. Histogram preferowanych natężeń oświetlenia na biurku.

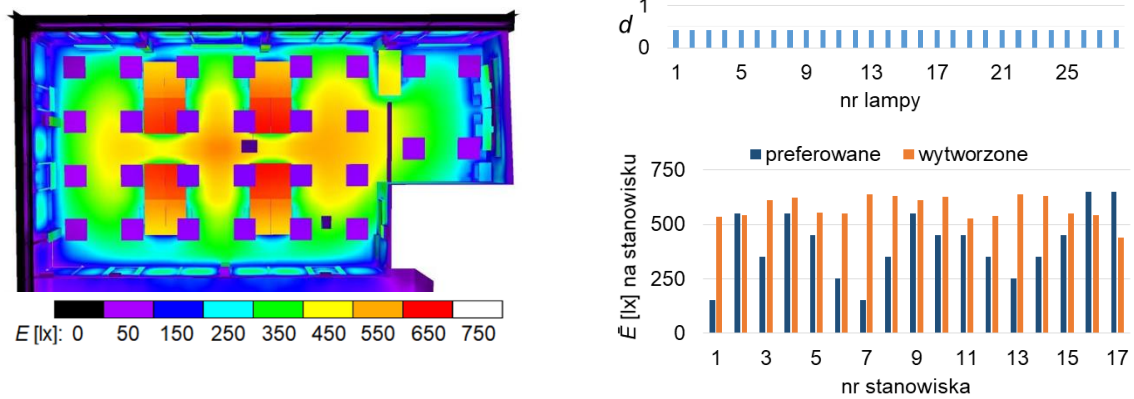


Rysunek 65. Oznaczenia stanowisk 1 – 17 w pomieszczeniu doświadczalnym wraz z preferencjami oświetleniowymi ich użytkowników.

Jako odniesienie dla kalkulacji oszczędności energii przyjęto zużycie występujące podczas pracy wszystkich lamp z taką samą nastawą $d_1, \dots, d_{28} = 0,42$, zapewniającą wytworzenie średniego natężenia oświetlenia 500 lx na obszarze zadania obejmującym całe pomieszczenie, z wyłączeniem pasa o szerokości 0,5 wzdłuż ścian. Odpowiada to pracy klasycznej, nieprzewymiarowanej instalacji oświetleniowej. Symulację pracy tego typu instalacji, z wykorzystaniem przyjętego modelu komputerowego pomieszczenia doświadczalnego⁴⁹ przedstawiono na rysunku 66. Uzyskany charakterystyczny rozkład, cechuje się występowaniem najwyższych natężeń oświetlenia w centralnej części pomieszczenia. Wynika to z występującego najsilniej

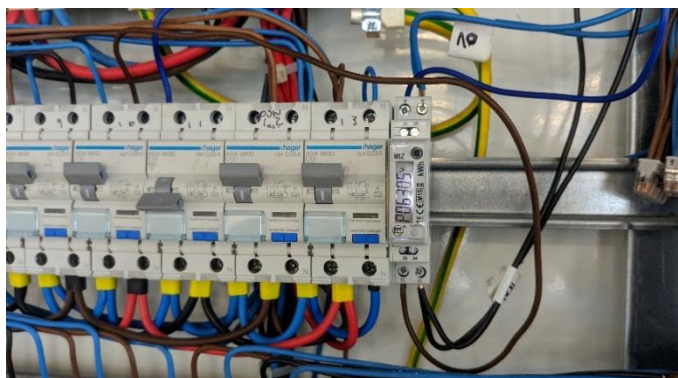
⁴⁹ Patrz: rozdz. 4.3, s. 111.

w tej strefie wspólnego oddziaływania promieni świetlnych lamp, padających bezpośrednio lub odbitych od powierzchni pomieszczenia. Na rysunku pokazano także współczynniki ściemnienia poszczególnych lamp oraz średnie natężenia oświetlenia wytwarzane na stanowiskach odniesione do preferowanych wartości.



Rysunek 66. Symulacja pracy tradycyjnej instalacji oświetleniowej wytwarzającej $\bar{E} \approx 500$ lx na obszarze zadania obejmującym całe pomieszczenie: rozkład natężenia oświetlenia, współczynniki ściemnienia lamp oraz średnie natężenia oświetlenia wytwarzane na stanowiskach w odniesieniu do preferowanych wartości.

W celu określenia poboru energii przez instalację oświetleniową przy zastosowaniu metody spersonalizowanego sterowania oświetleniem, wykorzystując infrastrukturę systemu sterowania i automatyzacji budynku MLBE w pomieszczeniu doświadczalnym 4.02 zaimplementowano prototyp systemu sterowania. Zadawanie zoptymalizowanych współczynników ściemnienia indywidualnych lamp (uzyskiwanych z programu Matlab na podstawie wektora oczekiwanych natężeń oświetlenia na zajętych stanowiskach pracy) odbywa się za pośrednictwem sterownika poziomu automatyzacji Loytec LINX-121 obsługującego IV piętro budynku, który za pomocą magistrali LON przesyła je do sterownika Loytec L-DALI-3E101, odpowiadającego za oświetlenie pomieszczenia doświadczalnego. Za obsługę tych informacji odpowiadają zmienne sieciowe wejściowe typu SNVT_switch o nazwie *nviLAValue* profilu funkcjonalnego elementu wykonawczego danej lampy (profil typu *Lamp Actuator #3040*). Sterownik L-DALI za pośrednictwem protokołu komunikacji DALI przesyła każdą nowo otrzymaną wartość do odpowiedniej lampy w trybie płynnego rozjaśniania i ściemniania lamp (dla zadawania szybkości zmian oświetlenia używana jest zmienna konfiguracyjna *nciFadeTime*). W tak zintegrowanym systemie, pomiaru mocy czynnej lamp dokonywano za pomocą bezpośredniego licznika typu Schrack MIZ 32A (patrz rysunek 67). Pobór energii przez urządzenia sterujące oraz czujniki zajętości stanowisk nie był uwzględniany.



Rysunek 67. Licznik energii elektrycznej typu Schrack MIZ 32A, zamontowany w tablicy piętrowej, w obwodzie oświetleniowym rozważanego pomieszczenia doświadczalnego

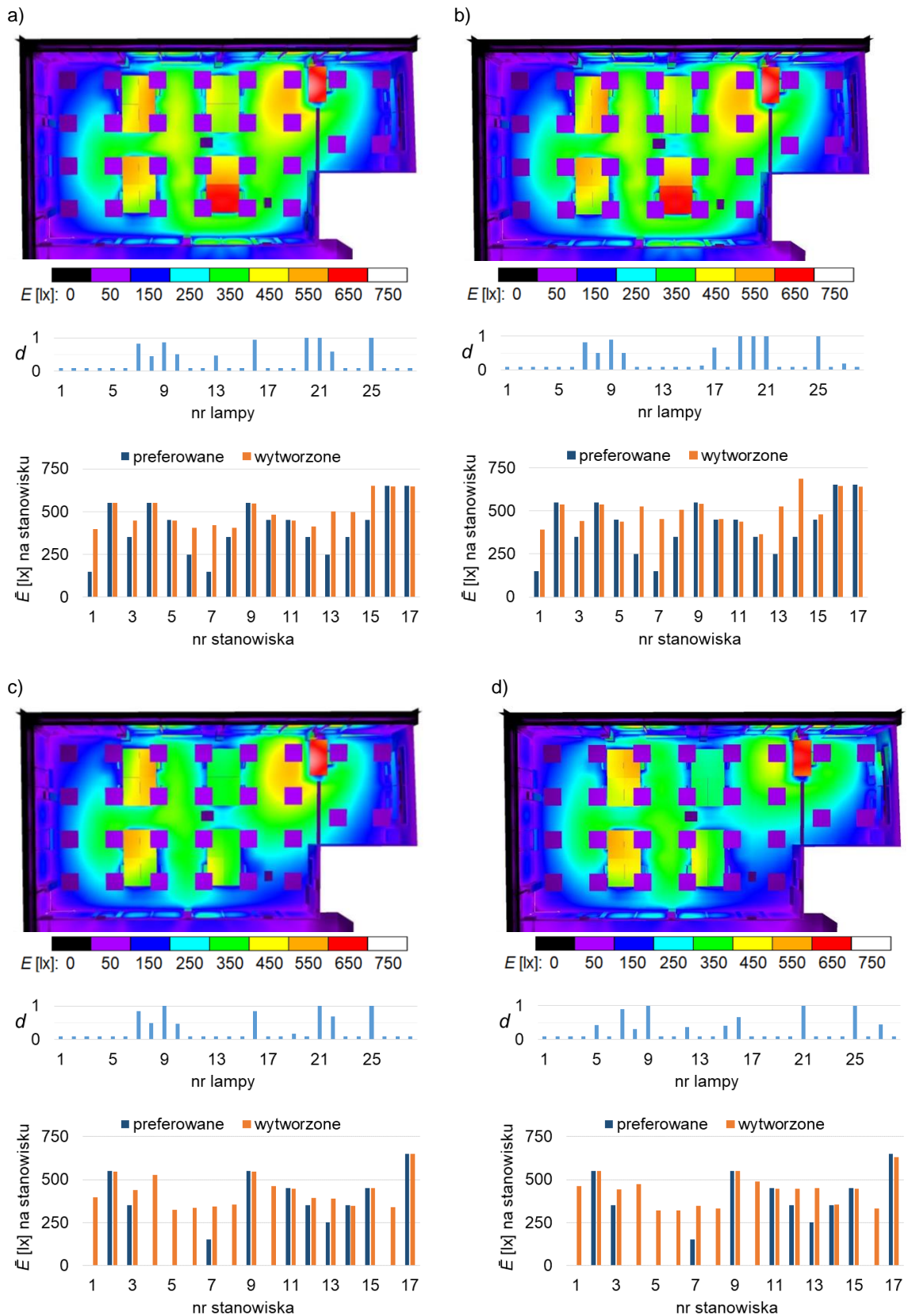
Wpływ spersonalizowanego sterowania na poprawę efektywności energetycznej oświetlenia, przykłady optymalnych rozwiązań

Na rysunkach 68 i 69 pokazano przykłady optymalnych rozwiązań w zależności od stanu zajętości stanowisk, w postaci symulacji rozkładu natężenia oświetlenia pomieszczenia, współczynników ściemnienia lamp oraz średnich natężeń oświetlenia wytwarzanych na stanowiskach w odniesieniu do preferowanych wartości. Słupki preferowanych natężeń oświetlenia wskazują, które stanowiska pozostają zajęte. Średnia preferencji oświetleniowych dla wszystkich wariantów o co najmniej dwóch stanowiskach zajętych mieści się w zakresie 400-410 lx.

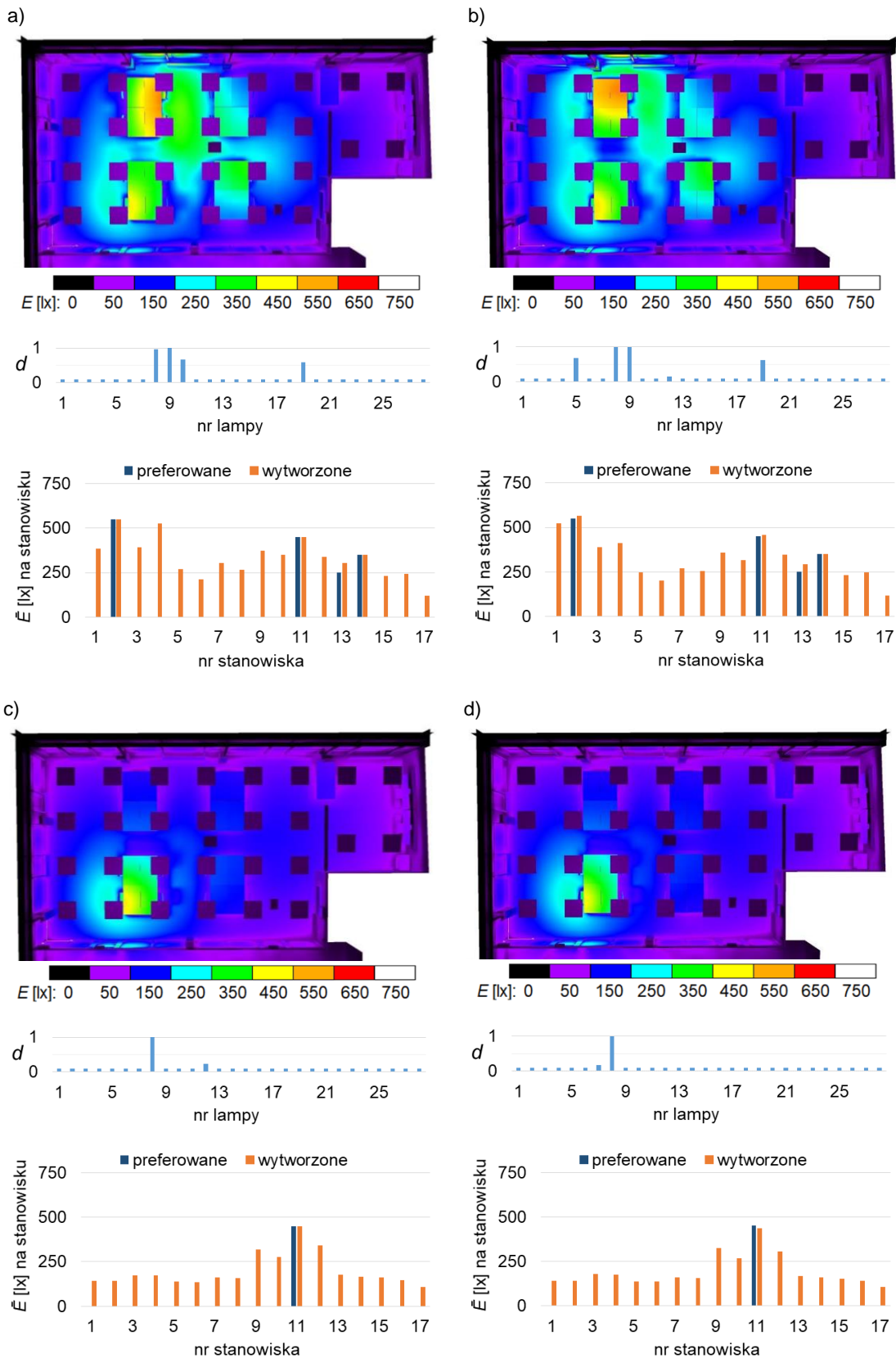
Na rysunkach można zauważyć, że w procesie sterowania brane są pod uwagę indywidualne upodobania oświetleniowe użytkowników. W przeciwieństwie do klasycznej instalacji oświetleniowej (patrz rysunek 66), natężenia oświetlenia wytwarzane na poszczególnych stanowiskach są różnicowane według preferencji 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.

Na rysunkach 68 i 69 można także zaobserwować, że w przypadku rozważanego pomieszczenia, na większości stanowisk osiągnęte wartości bezwzględne różnic procentowych między wytwarzanym, a preferowanym natężeniem oświetlenia mieszczą się w 50% zakresie tolerancji, a więc są praktycznie niezauważalne⁵⁰. Najwyższe wartości bezwzględne różnic występują przy wypełnionym pomieszczeniu i dotyczą tych stanowisk, których użytkownicy oczekiwali stosunkowo niskiego natężenia oświetlenia. Stanowiska te pozostają przeświecone, co wynika z ograniczonej skuteczności różnicowania natężeń oświetlenia w pomieszczeniu, zależnej między innymi od rozmieszczenia lamp, ich charakterystyki rozsyłu światłości, a także przyjętego warunku pracy wszystkich lamp z nastawą co najmniej $d_{min} = 0,1$.

⁵⁰ Patrz: rozdz. 3.2, s. 87.

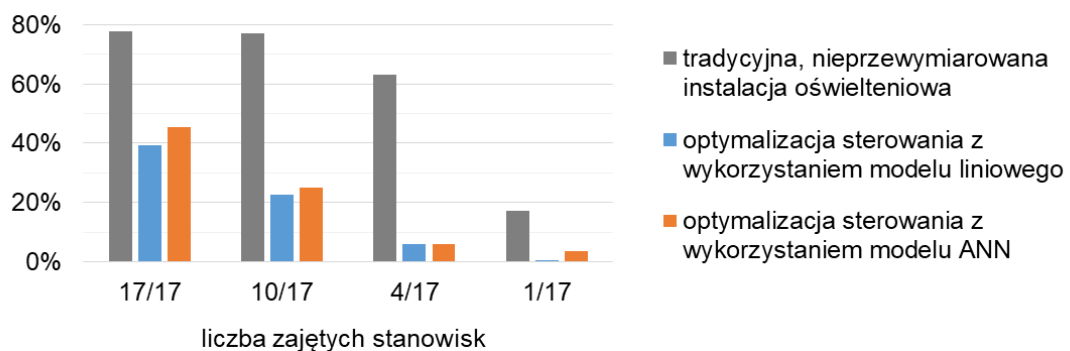


Rysunek 68. Przykłady optymalnych rozwiązań w postaci: symulacji rozkładów natężenia oświetlenia w pomieszczeniu, współczynników ściemnienia lamp oraz średnich natężeń oświetlenia wytwarzanych na stanowiskach w odniesieniu do preferowanych wartości; wszystkie stanowiska zajęte: a) model liniowy, b) model ANN; 10 z 17 stanowisk zajętych: c) model liniowy, d) model ANN.



Rysunek 69. Przykłady optymalnych rozwiązań w postaci: symulacji rozkładów natężenia oświetlenia w pomieszczeniu, współczynników ściemnienia lamp oraz średnich natężeń oświetlenia wytwarzanych na stanowiskach w odniesieniu do preferowanych wartości; 4 z 17 stanowisk zajętych: a) model liniowy, b) model ANN; 1 z 17 stanowisk zajętych: c) model liniowy, d) model ANN.

Na rysunku 70 pokazano uzyskiwane średnie wartości bezwzględnych różnic procentowych między wytwarzanym, a preferowanym natężeniem oświetlenia na zajętych stanowiskach, przy różnym obciążeniu pomieszczenia. We wszystkich przypadkach uzyskiwane różnice są znacząco niższe niż te, występujące dla tradycyjnej instalacji oświetleniowej. Niższe obciążenie pomieszczenia, ze względu na mniejszą liczbę ograniczeń przy optymalizacji, sprzyja dokładniejszemu odwzorowaniu preferencji użytkowników. Porównując rozważane metody, nieco lepsze odwzorowanie uzyskiwano w wyniku optymalizacji z wykorzystaniem modelu liniowego.

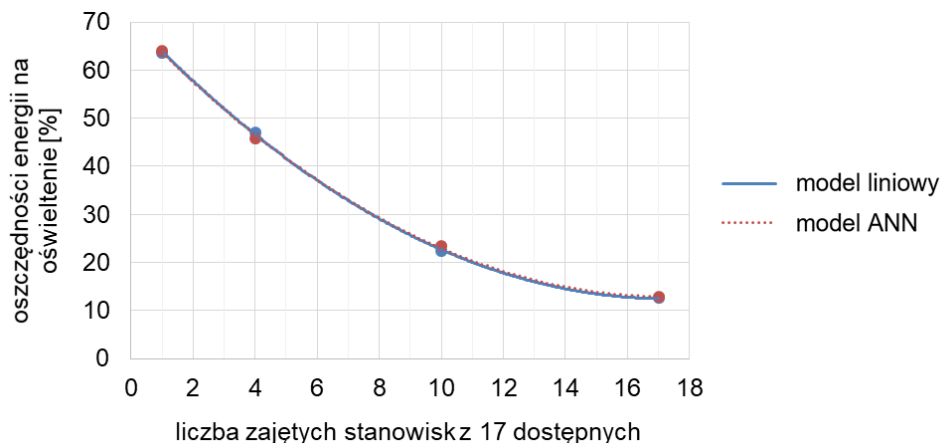


Rysunek 70. Średnie wartości bezwzględnych różnic procentowych między wytwarzanym, a preferowanym natężeniem oświetlenia na zajętych stanowiskach.

W tabeli 19 pokazano oszczędności energii wyznaczone na podstawie pomiarów wykonanych w pomieszczeniu doświadczalnym, uzyskane w wyniku spersonalizowanego sterowania oświetleniem ogólnym biura typu *open space* z wykorzystaniem: regulacji indywidualnej oraz przy jej współdziałaniu ze sterowaniem od zajętości stanowisk. Oszczędności te pokazano w odniesieniu zaprezentowanych wcześniej przykładów optymalnych rozwiązań, wyznaczonych dla wybranych stanów zajętości stanowisk. Jak można zauważyć, przy zajętych wszystkich stanowiskach, proponowana metoda prowadzi do obniżenia zużycia energii na poziomie 12,6–12,8%, w zależności od modelu poddanego optymalizacji. Oszczędności te wynikają wyłącznie z regulacji indywidualnej i mogą być osiągnięte także w przypadku systemu nieposiadającego możliwości wykrywania zajętości stanowisk. W wariancie z wykrywaniem, przy malejącym obciążeniu pomieszczenia oszczędności te są coraz wyższe i mogą sięgnąć nawet 63,7–64% przy jednej osobie obecnej w pomieszczeniu, preferującej natężenie oświetlenia na biurku na poziomie 450 lx (patrz rysunek 71). W przypadku obu rozważanych modeli matematycznych oszczędności uzyskiwane w wyniku optymalizacji nastaw lamp są bardzo zbliżone.

Tabela 19. Wynikowe oszczędności energii, uzyskiwane dzięki spersonalizowanemu sterowaniu oświetleniem ogólnym biura typu open space z wykorzystaniem: regulacji indywidualnej oraz przy jej współdziałaniu ze sterowaniem od zajętości stanowisk.

| metoda sterowania: I – regulacja indywidualna, ZW – wykrywanie zajętości stanowisk | liczba zajętych stanowisk | tradycyjna instalacja oświetleniowa ($\bar{E}=500lx$) moc czynna [W] | metoda spersonalizowanego sterowania | | | |
|---|---------------------------|---|---|--------------------------|---|--------------------------|
| | | | optymalizacja z wykorzystaniem modelu liniowego | | optymalizacja z wykorzystaniem modelu ANN | |
| | | | moc czynna [W] | oszczędności energii [%] | moc czynna [W] | oszczędności energii [%] |
| I | 17/17 | 648,1 | 566,7 | 12,6 | 565,0 | 12,8 |
| I + ZW | 10/17 | | 502,9 | 22,4 | 496,4 | 23,4 |
| I + ZW | 4/17 | | 342,9 | 47,1 | 350,8 | 45,9 |
| I + ZW | 1/17 | | 235,5 | 63,7 | 233,3 | 64,0 |



Rysunek 71. 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.

4.7. Wnioski

W wyniku działania metody spersonalizowanego sterowania, rozkład natężenia oświetlenia w pomieszczeniu jest modyfikowany w odpowiedzi na zmieniające się potrzeby oświetleniowe użytkowników lub stan zajętości stanowisk pracy.

Podczas obecności wszystkich użytkowników biura typu *open space*, metoda spersonalizowanego sterowania umożliwia obniżenie zużycia energii na oświetlenie o 12,6–12,8% w porównaniu do tradycyjnej instalacji oświetleniowej. Kiedy część stanowisk pozostaje niezajęta, metoda ta, łącząca regulację indywidualną oraz

sterowanie od zajętości stanowisk może przynieść oszczędności energii sięgające 64% w zależności od obciążenia pomieszczenia. W przypadku gdy instalacja oświetleniowa będzie nadmiernie przewymiarowana – jak ma to miejsce w praktyce projektowej⁵¹ – można oczekiwać, że osiągnęte oszczędności będą jeszcze wyższe. Przykładowo, w przypadku instalacji oświetleniowej przewymiarowanej o 20%, która wytwarza średnie natężenie oświetlenia na poziomie 600 lx uzyskiwane oszczędności wyniosą 28,7% - 70,7%.

Przy udziale oświetlenia na poziomie 14–40% w zużyciu energii ogółem przez biurowce oraz 20–60% w zużywanej przez nie energii elektrycznej⁵², oszczędności na poziomie 12,6–64% możliwe do uzyskania dzięki spersonalizowanemu sterowaniu dają znaczące korzyści energetyczne w skali całego budynku. Przyjmując powyższe dane, przy pominięciu wpływu uzyskiwanych oszczędności na bilans cieplny budynku⁵³, szacunkowe obniżenie zużycia energii przez budynek będzie się mieściło w zakresie:

- 1,8–25,6% dla energii ogółem,
- 2,5–38,4% dla energii elektrycznej.

Biorąc pod uwagę, wysoką popularność biur typu *open space*, a także ogólny udział budynków w światowym zużyciu energii, uzyskiwane oszczędności przyczynią się do znaczącego obniżenia zużycia energii w skali globalnej.

Ludzie mają zróżnicowane preferencje w zakresie natężenia oświetlenia, które uważane jest za najistotniejszy czynnik oceny otoczenia świetlnego⁵⁴. Jak pokazano, natężenia oświetlenia wytwarzane na zajętych stanowiskach w wyniku spersonalizowanego sterowania, są bliższe osobistym preferencjom ich użytkowników niż w przypadku tradycyjnej instalacji oświetleniowej. Zatem, w kontekście przeprowadzonych dotychczas rozważań⁵⁵, można stwierdzić, że wytwarzane warunki oświetleniowe są wyższej jakości, przestrzeń biura bardziej atrakcyjna, a ogólne warunki środowiskowe bardziej komfortowe. Przebywanie w takim otoczeniu pozytywnie wpływa na nastrój, motywację, a także wydajność pracy ludzi. Zarazem, podczas obecności użytkowników, praca wszystkich lamp przynajmniej z pewnym przyjętym, minimalnym współczynnikiem ściemnienia zapewnia oświetlenie pozostałych obszarów pomieszczenia, powierzchni i przestrzeni wnętrza.

Podsumowując można stwierdzić, że zastosowanie metody spersonalizowanego sterowania w odniesieniu do tradycyjnej instalacji oświetleniowej, będzie prowadziło do poprawy komfortu świetlnego użytkowników wieloosobowych biur typu *open space*, przy obniżonym zużyciu energii elektrycznej. W związku z tym, biorąc pod uwagę przyjętą we wstępie niniejszej pracy definicję poprawy efektywności

⁵¹ Patrz: rozdz. 1.1, s. 14.

⁵² Patrz: rozdz. 2.1, s. 31.

⁵³ Uzyskane oszczędności energii elektrycznej na oświetlenie, z uwagi na niższą emisję ciepła z lamp, będą skutkowały obniżeniem zapotrzebowania na energię do chłodzenia budynku w lecie oraz wzrostem jej zapotrzebowania na ogrzewanie w zimie.

⁵⁴ Patrz: rozdz. 3.2, s. 85.

⁵⁵ Patrz: rozdz. 4.1, s. 106.

energetycznej oświetlenia, można stwierdzić, że zaproponowana metoda prowadzi do poprawy efektywności energetycznej oświetlenia w pomieszczeniu biurowym typu *open space*.

Warto także zauważyć, że udostępnienie użytkownikom biur typu *open space* możliwości sterowania oświetleniem własnego stanowiska (regulacji indywidualnej), dzięki zaspokojeniu potrzeby kontroli wpływa bezpośrednio na poprawę komfortu i satysfakcji ludzi – użytkownicy mają świadomość, że sami decydują o oświetleniu własnego stanowiska^{56, 57}.

W przypadku zmian preferowanego natężenia oświetlenia (np. w wyniku zmiany rodzaju aktywności) lub zajętości stanowisk pracy, rozkład natężenia oświetlenia w pomieszczeniu będzie ulegał zmianom. W celu ograniczenia dyskomfortu wywołanego tego typu zmianami, oświetlenie niezajętych stanowisk pozostaje ściemnione dla uzyskania łagodniejszego kontrastu między zajmowanymi i pustymi stanowiskami. Z uwagi na wysoką tolerancję ludzi dla powolnych zmian natężenia oświetlenia⁵⁸, a także nawiązując do płynnych zmian światła naturalnego – ściemnianie i rozjaśnianie lamp odbywa się w sposób łagodny w tempie do kilkudziesięciu luksów na sekundę, aż do osiągnięcia nowego stanu ustalonego oświetlenia.

Wdrożenie spersonalizowanego sterowania, dzięki możliwości lokalnej regulacji poziomu oświetlenia na stanowiskach pracy w tego typu biurach, przypuszczalnie powinno zredukować ograniczający wpływ uwarunkowań społecznych⁵⁹, ułatwiając użytkownikom dostosowanie oświetlenia do własnych preferencji. Konieczne są jednak dalsze badania w tym kierunku.

Przedstawione rozważania sugerują, że zastosowanie metody spersonalizowanego sterowania w biurach typu *open space*, będzie prowadziło do poprawy satysfakcji i komfortu użytkowników, a zatem metoda ta będzie dla nich akceptowalna. Dzięki temu możliwe będzie utrzymanie jej potencjału poprawy efektywności energetycznej w rzeczywistych budynkach (działania systemu nie będą świadomie paraliżowane przez użytkowników).

W ramach pracy przygotowano kwestionariusz dotyczący zadowolenia z warunków oświetleniowych (załącznik A), który będzie wykorzystany do badań z udziałem ludzi, po opanowaniu pandemii COVID-19. Badania te, umożliwią ocenę poziomu ich satysfakcji z wytwarzanych warunków oświetleniowych, zarówno w stanach ustalonych jak i przy zmianach oświetlenia na skutek jego lokalnego sterowania w otwartych przestrzeniach biurowych.

W zależności od preferencji obecnych użytkowników, a także charakterystyki pomieszczenia i systemu oświetleniowego uzyskiwane oszczędności energii oraz różnice występujące między preferowanymi, a wytwarzanymi natężeniami oświetlenia

⁵⁶ Patrz: rozdz. 3.2, s. 85.

⁵⁷ Patrz: rozdz. 4.1, s. 105.

⁵⁸ Patrz: rozdz. 3.2, s. 87.

⁵⁹ Patrz: rozdz. 4.1, s. 105.

mogą być odmienne. Możliwość różnicowania natężeń oświetlenia na pobliskich stanowiskach pracy jest ograniczona powyższymi charakterystykami, a także przyjętym warunkiem działania wszystkich lamp z pewnym minimalnym współczynnikiem ściemnienia. Stanowiska, których użytkownicy oczekują bardzo niskich natężeń oświetlenia, mogą pozostawać prześwietlone.

Rzeczywiste osiągnięte oszczędności energii na oświetlenie będą nieco niższe ze względu na pobór energii przez urządzenia sterujące oraz czujniki zajętości stanowisk (w zależności od zastosowanego rozwiązania). W celu ograniczenia poboru energii pasożytniczej, poza godzinami pracy biura można stosować „twarde” wyłączenie części instalacji np. zasilania lamp lub czujników stanowiskowych.

Z uwagi na brak czujników światła, rozwiązanie będzie charakteryzowało się niskim kosztem, elastycznością i łatwością instalacji w pomieszczeniu. Jego wadą wynikającą z braku informacji zwrotnej o aktualnym stanie obiektu sterowanego jest nieuwzględnianie eksploatacyjnej zmiany parametrów oświetlenia, co może skutkować pogłębianiem się różnic między preferowanym, a wytwarzanym natężeniem oświetlenia (różnice te mogą być kompensowane ręcznie przez samych użytkowników, poprzez zadanie jaśniejszego oświetlenia), a także pogarszaniem się skuteczności optymalizacji. W zależności od przyjętej metody detekcji zajętości stanowisk, może być także niezbędny montaż odpowiednich czujników.

W całkowitych kosztach prowadzenia biura, dominującym składnikiem są koszty pracy ludzi (pensje, dodatki i szkolenia dla pracowników) [47, 127, 339]. Zatem z punktu widzenia rachunku ekonomicznego pracodawcy, głównym celem oświetlenia powinno być wspieranie pracowników w ich zadaniach i zapewnienie satysfakcji z warunków oświetleniowych. Korzyści dla pracodawcy, w postaci większej satysfakcji pracowników, wydajności pracy i redukcji absencji – wynikające ze indywidualnego sterowania oświetleniem – mogą nawet przewyższyć oszczędności wynikające z ograniczenia zużycia energii elektrycznej [316].

W niniejszym opracowaniu przyjęto zróżnicowane potrzeby oświetleniowe na stanowiskach, według uzyskanego na podstawie badań doświadczalnych rozkładu preferencji, co jest kluczowe dla określenia osiągniętych oszczędności energii w otwartej przestrzeni biurowej, a także pokazania możliwości różnicowania natężenia oświetlenia w przestrzeni pomieszczenia. Różni to niniejsze opracowanie od dotychczasowych publikacji, dotyczących regulacji indywidualnej w biurach typu *open space* [285, 163], w których zakładano, że wszystkie osoby preferują to samo natężenie oświetlenia wynoszące 350, 300 lub 200 lx. Z kolei w opracowaniach uwzględniających także sterowanie od zajętości stanowisk [53, 331], choć przyjęto zróżnicowane preferencje użytkowników nie wskazano jednak pochodzenia tych danych. Odnosząc je do przeprowadzonej w ramach rozprawy analizy⁶⁰, można zauważyć, że przyjęte preferowane natężenia oświetlenia były stosunkowo niskie (co najwyżej 370 lx, średnia preferencji 233–267 lx). Ponadto, pomimo iż rozważane pomieszczenie opisano jako

⁶⁰ Patrz: rozdz. 3.2, s. 87.

biuro typu *open space*, za sprawą stanowisk pracy rozmieszczonych wzdłuż ścian i zwrócenia siedzących osób w ich kierunku, bardziej przypomina ono laboratorium komputerowe. Warto też podkreślić, że w żadnym z przywołanych opracowań efekt energetyczny sterowania nie został wyznaczony w sposób doświadczalny.

5. Wytyczne do ustawień oświetlenia w otwartej przestrzeni biurowej, z wykorzystaniem nowoczesnych instalacji elektrycznych stosowanych w budynkach biurowych typu *smart*

Poniżej przedstawiono założenia i wytyczne do ustawień oświetlenia w otwartej przestrzeni biurowej, z wykorzystaniem nowoczesnych instalacji elektrycznych stosowanych w budynkach biurowych typu *smart*, w kontekście celów realizowanych w ramach metody spersonalizowanego sterowania oświetleniem.

Funkcja oświetlenia, wytworzenie ergonomicznych warunków pracy wzrokowej oraz uwzględnienie indywidualnych potrzeb użytkowników, poprzez dostosowanie warunków oświetleniowych do ich preferencji

Metoda spersonalizowanego sterowania oświetleniem ogólnym może być uniwersalnie wykorzystywana w procesie sterowania oświetleniem w rzeczywistych pomieszczeniach biurowych typu *open space*, wyposażonych w indywidualnie sterowane lampy LED. Metoda ta może być zastosowana we wnętrzach o dowolnej charakterystyce świetlnej, kształcie, kubaturze itp. Stanowiska pracy mogą być swobodnie rozmieszczone względem siatki opraw oświetleniowych, choć ze względu na poprawę możliwości różnicowania natężeń oświetlenia między nimi, zaleca się aby lampa znajdowała się bezpośrednio nad stanowiskiem. Ogólny scenariusz działania metody w otwartej przestrzeni biurowej zawarto w podrozdziale 4.1.

Lampy typu LED charakteryzują się wysoką skutecznością świetlną podczas pracy w stanie zredukowanego naświetlania. Powinny być one ponadto wyposażone w wysokiej jakości układy zasilające, zapewniające stabilną emisję strumienia świetlnego w czasie (minimalny wskaźnik migotania światła), niski poziom zaburzeń emitowanych do sieci elektroenergetycznej oraz wysoką niezawodność. W przypadku wykorzystania modelu liniowego, zastosowane lampy LED powinny charakteryzować się możliwie liniową charakterystyką regulacji strumienia świetlnego. Ponieważ temperatura w biurach zmienia się w niewielkim zakresie, można pominąć jej wpływ na emisję strumienia świetlnego lamp LED.

Jeżeli budynek jest wyposażony w istniejącą instalację oświetleniową w standardzie DALI, zintegrowaną z systemem sterowania i automatyzacji, implementacja proponowanej metody sterowania nie wymaga modyfikacji okablowania lamp, a do zadawania współczynników ściemnienia lamp może być wykorzystany istniejący protokół komunikacji. Algorytm optymalizacji, korzystający z wybranego modelu matematycznego pomieszczenia, powinien zostać

zaimplementowany w odpowiednim sterowniku lub komputerze, z którym skomunikować należy również indywidualne interfejsy użytkowników oraz urządzenia wykrywające zajętość stanowisk.

W sytuacji, gdy nie wszystkie oprawy oświetleniowe są sterowane niezależnie, zastosowanie spersonalizowanego sterowania oświetleniem ogólnym jest możliwe, pod warunkiem traktowania całych grup lamp sterowanych wspólnie jako „jednej” lampy w rozumieniu proponowanej metody (w takim przypadku, pogorszeniu ulegają możliwości wytwarzania zróżnicowanych warunków oświetleniowych na pobliskich stanowiskach oraz poprawy efektywności energetycznej).

Warunkiem prawidłowego odwzorowywania systemu oświetleniowego przez przyjęty model (liniowy lub nieliniowy), a więc także skutecznej optymalizacji sterowania jest niezmienność charakterystyki świetlnej pomieszczenia oraz własności samego systemu oświetleniowego. Eksploatacyjny spadek strumienia świetlnego lamp LED może być kompensowany ręcznie przez użytkowników, poprzez zadanie jaśniejszego oświetlenia stanowiska. Należy prowadzić regularne czynności konserwacyjne urządzeń oświetleniowych, zwracając szczególną uwagę na uszkodzenie źródeł światła oraz spadek emisji strumienia świetlnego lamp LED. Gdy w pomieszczeniu wystąpią znaczące zmiany (np. w przypadku modyfikacji układu stanowisk), konieczna jest aktualizacja modelu matematycznego pomieszczenia, na podstawie wyników pomiarów lub symulacji komputerowej⁶¹.

W odniesieniu do biur typu *open space* proponuje się przyjęcie interpretacji wytycznych normy PN-EN 12464-1:2012 [7], według której obszarem zadania są biurka obecnych pracowników, obszarem bezpośredniego otoczenia inne niezajęte biurka z tej samej grupy biurek, a obszar tła to pozostała przestrzeń pomieszczenia (patrz rysunek 55).

Dla zaspokojenia potrzeb niemal wszystkich pracowników zakres regulacji natężenia oświetlenia na obszarze zadania powinien sięgać co najmniej 700 lx⁶² (przy uwzględnieniu eksploatacyjnej zmiany parametrów oświetlenia). Zbyt wysokie, maksymalne dostępne natężenie oświetlenia może powodować wzrost zużycia energii, na skutek przesunięcia preferowanych natężeń oświetlenia w kierunku wyższych nastaw⁶³.

Ponieważ niższa nastawa początkowa dla nowego użytkownika (którego preferencje są nieznane) sprzyja racjonalizacji zużycia energii bez szkody dla komfortu i prawności wzrokowej⁶⁴, zatem powinno się przyjmować ją na stosunkowo niskim poziomie. Proponuje się przyjmowanie wartości około 30% dostępnego zakresu regulacji.

⁶¹ Patrz: rozdz. 4.4, s. 132.

⁶² Patrz: rozdz. 3.2, s. 85.

⁶³ Tamże.

⁶⁴ Tamże.

Dla zapewnienia równomiernego rozkładu luminancji w polu widzenia, natężenie oświetlenia na obszarach bezpośredniego otoczenia powinno stanowić co najmniej 50% najwyższego preferowanego natężenia oświetlenia w danej grupie biur⁶⁵.

Podczas obecności osób, dla zapewnienia oświetlenia obszaru tła, powierzchni ścian i sufitu oraz przestrzeni wnętrza, wszystkie lampy w pomieszczeniu powinny być włączone i pracować przynajmniej z pewnym minimalnym współczynnikiem ściemnienia zapewniającym wytworzenie średnich natężeń oświetlenia według zaleceń normy PN-EN 12464-1:2012 [7]: 100 lx na obszarze tła, 75 lx na ścianach oraz 50 lx na suficie. Dla średniego cylindrycznego natężenia oświetlenia proponuje się przyjęcie kryterium 50 lx (wartość zalecana przez wspomnianą normę dla ogółu wnętrz), z uwagi na umożliwienie odpowiednio głębokiej regulacji w dół natężenia oświetlenia na stanowiskach pracy.

Zajmowanie przez użytkowników o zbliżonych preferencjach oświetleniowych stanowisk w ramach jednej grupy biur, ułatwia zaspokojenie różnicowań potrzeb oświetleniowych w obrębie pomieszczenia.

W celu ograniczenia dyskomfortu wywołanego zmianami w oświetleniu, zaleca się stosowanie łagodnych przejść między stanami oświetlenia poprzez powolne ściemnianie i rozjaśnianie lamp (do kilkudziesięciu luksów na sekundę), co wynika z wysokiej tolerancji ludzi dla powolnych zmian natężenia oświetlenia⁶⁶, a także nawiązuje do płynnych zmian światła naturalnego.

Reagowanie na zachowania użytkowników, poprzez dostosowanie warunków oświetleniowych do ich obecności lub rodzaju wykonywanego zadania wzrokowego

Ocena bieżącego stanu zajętości poszczególnych stanowisk pracy może się odbywać za pomocą metod wykrywania zestawionych w tabeli 5 (należy zwrócić uwagę przede wszystkim na metody, których optymalnym zastosowaniem jest wykrywanie zajętości poszczególnych stanowisk pracy w biurach). W zależności od przyjętej metody detekcji, może być niezbędny montaż odpowiednich czujników. Możliwe jest zastosowanie wariantu wykorzystującego jedynie regulację indywidualną dla uzyskania indywidualnej wygody widzenia oraz obniżenia zużycia energii (szczególnie w przypadku gdy wszystkie stanowiska są stale zajęte w godzinach użytkowania biura), jednak nie uzyskuje się wtedy dodatkowych korzyści w postaci niższego zużycia energii, wynikającego z ściemniania oświetlenia niezajętych stanowisk.

W celu ograniczenia poboru energii pasożytniczej, poza godzinami użytkowania biura, warto rozważyć zastosowanie „twardego” wyłączenia części instalacji np. zasilania lamp lub czujników stanowiskowych.

⁶⁵ Patrz: rozdz. 4.4, s. 118.

⁶⁶ Patrz: rozdz. 3.2, s. 87.

W zależności od rodzaju wykonywanego zadania wzrokowego, użytkownik za pośrednictwem indywidualnego interfejsu komunikacji powinien mieć możliwość wyboru aktualnego profilu aktywności (np. czytanie z ekranu, czytanie tekstu drukowanego, pisanie na papierze, pisanie na klawiaturze, profil własny), korekty ustawień oświetlenia oraz ich zapamiętania dla wybranego profilu. W oparciu o aktualnie wybraną nastawę jest realizowana optymalizacja współczynników ściemnienia lamp. Wytyczne dla identyfikacji użytkownika, niezbędnej w celu przywołania zapamiętanych ustawień oświetlenia po zajęciu przez niego stanowiska opisano w rozdziale 4.1.

Intuicyjna obsługa i komunikacja, również dla nieobytych z techniką użytkowników

Dla poprawy interakcji, indywidualny interfejs komunikacji powinien być łatwo dostępny dla każdego użytkownika, dlatego proponuje się jego implementację w postaci aplikacji na komputerze, tablecie lub smartfonie pracownika. Interfejs graficzny powinien być prosty i przyjazny, a obsługa intuicyjna (również dla osób nieobytych z techniką). Ponadto użytkownicy powinni zostać przeszkoleni w zakresie jego prawidłowego użytkowania, a także powinni rozumieć cel i ogólny sposób działania systemu sterowania.

Analiza możliwości jednoczesnej realizacji pozostałych celów sterowania, stawianych przed systemem oświetleniowym typu *smart*

Nawiązując do pozostałych celów sterowania, stawianych przed systemem oświetleniowym typu *smart*, możliwości i warunki ich jednoczesnej realizacji z metodą spersonalizowanego sterowania oświetleniem ogólnym są następujące:

- wykorzystywanie światła dziennego i dynamiczne reagowanie na jego zmienność w celu kompensowania niedoborów światła naturalnego – informacja o rozkładzie światła dziennego w pomieszczeniu może być wykorzystana do dalszej optymalizacji proponowanego rozwiązania, przyczyniając się do zwiększenia uzyskiwanych oszczędności energii (zagadnienie to będzie przedmiotem dalszych prac badawczych autora),
- funkcja aranżowania scen świetlnych – metoda spersonalizowanego sterowania oświetleniem może stanowić specjalną aktywną scenę świetlną (oświetlenie spersonalizowane), podczas gdy pozostałe sceny świetlne mogą realizować inne ustawienia oświetlenia,
- pozytywne oddziaływanie na organizm człowieka w zakresie efektu biologicznego niewizualnego, poprzez np. zmiany w natężeniu oświetlenia lub temperaturze barwowej – realizacja wymaga dalszych badań (obecnie brak jest jednoznacznych wytycznych dla tzw. „oświetlenia algorytmicznego”),

- funkcja raportowania o zużyciu energii oraz zaistniałych awariach – realizacja możliwa w ramach funkcji sterownika oświetleniowego DALI lub zintegrowanego systemu sterowania,
- niezwłoczna i niezawodna realizacja funkcji sterowania – realizacja wymaga implementacji rozwiązania do zastosowań praktycznych i dalszych badań (zagadnienie to będzie przedmiotem przyszłych prac badawczych autora),
- niski poziom „nachalności” – działania systemu realizowane są w sposób, który nie powoduje dyskomfortu użytkowników; obecność systemu sterowania powinna pozostawać „niezauważalna” dla użytkowników – realizacja wymaga implementacji rozwiązania do zastosowań praktycznych i dalszych badań (zagadnienie to będzie przedmiotem przyszłych prac badawczych autora),
- funkcja zdalnego sterowania – realizacja możliwa w ramach funkcji zintegrowanego systemu sterowania,
- integracja z systemem ruchomych przeston zacinających, umożliwiającą dostosowanie ilości światła dziennego, np. w celu ograniczania olśnienia – integracja może umożliwić dalszą optymalizację proponowanego rozwiązania, wpływając na poprawę komfortu użytkowników, których stanowiska są zlokalizowane w pobliżu okien; jej realizacja wymaga jednak dalszych badań,
- symulowanie w sposób nieszablonowy zachowania użytkownika podczas jego nieobecności (dla realizacji funkcji systemu bezpieczeństwa) – funkcja ta zasadniczo dotyczy budynków mieszkalnych; realizacja możliwa, ponieważ symulacja odbywa się poza godzinami użytkowania pomieszczenia.

6. Podsumowanie

Obecnie, dzięki wysokiej skuteczności świetlnej źródeł LED podczas pracy w stanie zredukowanego naświetlania, metody energooszczędnego sterowania oświetleniem wykorzystujące ściemnianie lamp zyskują na znaczeniu. Jedną z takich metod jest regulacja indywidualna, która umożliwia 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.

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 [56, 23, 386, 117, 387].

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 zrealizowano założone cele, co uzasadniono w poniższych podrozdziałach.

Analiza wierności odwzorowania rzeczywistego otoczenia świetlnego w oprogramowaniu symulacyjnym i identyfikacja czynników mających istotny wpływ na uzyskiwane wyniki

W podrozdziale 4.3 autor przedstawił proces doboru modelu pomieszczenia doświadczalnego zaaranżowanego jako biuro typu *open space*, opracowanego z wykorzystaniem oprogramowaniu 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.

Analiza możliwości poprawy efektywności energetycznej pracy instalacji oświetleniowej, z wykorzystaniem nowoczesnej instalacji elektrycznej stosowanej w budownictwie typu *smart*

W rozdziale 2, na podstawie analizy dostępnej literatury, autor pokazał znaczący udział budynków w światowym zużyciu energii ogółem oraz zużyciu energii elektrycznej, a także wykazał, że oświetlenie jest obszarem o istotnym wpływie na bilans energetyczny całego budynku, zwłaszcza biurowego. 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 systemów automatycznego sterowania przez ludzi, który bywa zaniedbywany, a jest często kluczowy dla osiągnięcia rzeczywistej, wysokiej efektywności energetycznej istniejących budynków. Następnie 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. Następnie 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 sterowania. Uzasadnieniem podjęcia badań własnych w tym zakresie, była konieczność uaktualnienia stanu wiedzy (opublikowane w 2012 r. wyniki metaanalizy [284] nie uwzględniają najnowszych opracowań). Z kolei w podrozdziale 4.1 zwrócono uwagę na znaczenie koordynacji systemów osobistej kontroli środowiska (których jednym z obszarów jest indywidualne oświetlenie stanowisk pracy) z infrastrukturą budynku typu *smart* dla poprawy jego efektywności energetycznej.

Identyfikacja parametrów otoczenia świetlnego i zjawisk towarzyszących pracy instalacji oświetleniowej, które mogą mieć wpływ na ocenę oświetlenia i sposobu jego sterowania przez użytkowników

W rozdziale 3 przedstawiono obecne rekomendacje dotyczące oświetlenia biurowych stanowisk pracy, a następnie na podstawie analizy wyników 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. Wskazano także, że natężenie oświetlenia stanowi najistotniejszy czynnik oceny otoczenia świetlnego. Opisano również charakterystykę pomieszczeń Małopolskiego Laboratorium Budownictwa Energooszczędnego, które wybrano na potrzeby doświadczalnych badań własnych. Uzupełnieniem opisu są przedstawione wyniki pomiarów wybranych parametrów charakteryzujących jakość oświetlenia w rozważanych pomieszczeniach. Następnie, zaprezentowano wyniki ankietowych badań własnych, przeprowadzonych w pomieszczeniu doświadczalnym. W oparciu o dostępną literaturę autor opracował kwestionariusz komputerowy, a następnie przeprowadził doświadczenie z udziałem 239 osób, które oceniały warunki oświetleniowe w nowoczesnych biurach, wytworzone zgodnie z obowiązującymi rekomendacjami. Ponieważ znacząca liczba osób preferowała niższe natężenie oświetlenia uzyskano potwierdzenie, że udostępnienie użytkownikom możliwości regulacji indywidualnej, będzie zapewniało

dodatkowe oszczędności energii podczas ich obecności. Ponadto 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. W podrozdziale 2.4 wskazano główne czynniki prowadzące do braku akceptacji przez ludzi systemów automatycznego sterowania oraz podano cechy systemu automatycznego sterowania oświetleniem w biurze, które sprzyjają jego akceptacji przez użytkowników. W dalszej części pracy, w podrozdziale 4.1 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.

Propozycja rozwiązania, symulacje, opracowanie prototypu systemu

W rozdziale 2 opisano biura na planie otwartym (typu *open space*), które charakteryzują się brakiem przegród między stanowiskami, przez co natężenie oświetlenia na danym stanowisku wynika z oddziaływania wszystkich lamp. Zwrócono także uwagę na różne schematy zajętości stanowisk pracy w przestrzeniach biurowych. W oparciu o dotychczasowe rozważania, w rozdziale 4 autor zaproponował koncepcję metody spersonalizowanego, lokalnego sterowania oświetleniem ogólnym w tego typu biurze, która łączy regulację indywidualną i sterowanie od zajętości poszczególnych stanowisk pracy. Następnie, opisano problematykę tego rodzaju sterowania w biurach typu *open space* oraz zaproponowano schemat ideowy proponowanej metody sterowania. Zwrócono 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. 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 biurek (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. Następnie, 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). Modelowi ANN tego typu systemu o 28 wejściach i 17 wyjściach, złożonością dorównuje jedynie model zaproponowany w publikacji zawierającej częściowe efekty pracy nad niniejszą rozprawą [386]. Pomimo iż zastosowanie sieci neuronowych rozważa się w sterowaniu oświetleniem przestrzeni biurowych, to opisywane w literaturze systemy charakteryzowały się co najwyżej 14 wejściami i 12 wyjściami [172, 285, 54]. 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 zaproponował oryginalne algorytmy optymalizacji sterowania, wykorzystujące opracowane modele matematyczne systemu oświetleniowego. 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, a także oświetlenia pozostałych obszarów pomieszczenia. Dla przyjętych preferencji oświetleniowych użytkowników i wybranych stanów zajętości stanowisk przedstawiono przykłady optymalnych rozwiązań, uzyskane przy zastosowaniu obu zaproponowanych metod optymalizacji, ze szczególnym uwzględnieniem: wynikowych rozkładów natężenia oświetlenia, współczynników ściemnienia lamp oraz natężeń oświetlenia wytwarzanych na stanowiskach w odniesieniu do preferowanych wartości. Na potrzeby badań doświadczalnych, wykorzystując infrastrukturę systemu sterowania i automatyzacji budynku Małopolskiego Laboratorium Budownictwa Energooszczędnego w pomieszczeniu doświadczalnym 4.02 autor dokonał implementacji prototypu systemu sterowania.

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

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 (rozdział 4). Tym samym, na przykładzie wybranego pomieszczenia doświadczalnego autor wykazał skuteczność

proponowanej metody w poprawie efektywności energetycznej pracy instalacji oświetleniowej. Opracowanie to 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.

Opracowanie wytycznych do ustawień oświetlenia w budynku biurowym, z wykorzystaniem nowoczesnych instalacji elektrycznych stosowanych w budynkach biurowych typu *smart*, realizującego cele:

- **funkcja 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,**
- **intuicyjna obsługa i komunikacja, również dla nieobytych z techniką użytkowników.**

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 wymienionych powyżej celów realizowanych w ramach metody spersonalizowanego sterowania oświetleniem. Uwzględniają one czynniki takie jak:

- liczbę użytkowników i ich rozmieszczenie w pomieszczeniu,
- metodę identyfikacji użytkownika,
- metodę komunikacji z użytkownikiem,
- rodzaj i specyfikę użytkowania 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.

Ponadto, przeprowadzono analizę możliwości jednoczesnej realizacji pozostałych celów sterowania, stawianych przed systemem oświetleniowym typu *smart*.

Biorąc pod uwagę wyniki badań przedstawionych w rozprawie można stwierdzić, że wszystkie cele pracy zostały osiągnięte. Udowodniona została również postawiona teza, mówiąca że: **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.**

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 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.

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.

7. Literatura

- [1] Adaszyńska E. i Kuncewicz M., „Osoby z dysfunkcją wzroku a cyfrowa przestrzeń informacyjna”, *Biuletyn EBiB*, tom 128, nr 1, 2012.
- [2] Marzec S., Ślirz W. i Kruczek P., *Badania oświetlenia*, Kraków: DASL Systems, 2011.
- [3] Bąk J. i Pabjańczyk W., *Podstawy techniki świetlnej*, Łódź: Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 1994.
- [4] Żagan W., *Podstawy techniki świetlnej*, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2005.
- [5] Fryc I., Fryc J. i Wąsowski K. A., „Rozważania o jakości oddawania barw źródeł światła, wyrażanej wskaźnikiem Ra (CRI), uwzględniające fizjologię widzenia oraz zagadnienia techniczno-prawne”, *Przegląd Elektrotechniczny*, tom 92, nr 2, pp. 218-223, 2016.
- [6] Webb A. R., „Considerations for lighting in the built environment: Non-visual effects of light”, *Energy and Buildings*, tom 38, nr 7, pp. 721-727, 2006.
- [7] PN-EN 12464-1:2012 Światło i oświetlenie - Oświetlenie miejsc pracy - Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach.
- [8] ES-SYSTEM, „Katalog główny Light Impressions”, 2015.
- [9] Engwall M., Fridh I., Johansson L., Bergbom I. i Lindahl B., „Lighting, sleep and circadian rhythm: An intervention study in the intensive care unit”, *Intensive and Critical Care Nursing*, tom 31, nr 6, pp. 325-335, 2015.
- [10] Kwon S. Y. i Lim J. H., „Multi-objective context-adaptive natural lighting system”, *Energy and Buildings*, tom 144, pp. 61-73, 2017.
- [11] Bellia L., Bisegna F. i Spada G., „Lighting in indoor environments: Visual and non-visual effects of light sources with different spectral power distributions”, *Building and Environment*, tom 46, nr 10, pp. 1984-1992, 2011.
- [12] Souman J. L., Tinga A. M., te Pas S. F., van Ee R. i Vlaskamp B. N. S., „Acute alerting effects of light: A systematic literature review”, *Behavioural Brain Research*, tom 337, pp. 228-239, 2018.
- [13] van Duijnhoven J., Aarts M. P. J., Kort H. S. M. i Rosemann A. L. P., „External validations of a non-obtrusive practical method to measure personal lighting conditions in offices”, *Building and Environment*, tom 134, pp. 74-86, 2018.
- [14] van Bosmmel W. J. M. i van den Beld G. J., „Lighting for work: a review of visual and biological effects”, *Lighting Research & Technology*, tom 36, nr 4, pp. 255-269, 2004.
- [15] Turlej Z., „PN-EN 12464-1:2012 Światło i oświetlenie - Oświetlenie miejsc pracy - Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach”, *Wiadomości PKN*, nr 7, pp. 5-8, 2013.
- [16] Chew I., Karunatilaka D., Tan C. P. i Kalavally V., „Smart lighting: The way forward? Reviewing the past to shape the future”, *Energy and Buildings*, tom 149, pp. 180-191, 2017.
- [17] Wolska A., „Intelligent lighting systems and users' visual fatigue”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 5, pp. 97-99, 2007.
- [18] Raatikainen M., Ciszek R., Närvainen J., Merilahti J., Siikanen S., Ollikainen T., Hallikainen I. i Skön J. P., „System architecture of customized intelligent lighting control and indoor environment monitoring system for persons with mild cognitive impairment or dementia”, *e-Health Networking, Applications and Services (Healthcom), 2016 IEEE 18th International Conference on*, 2016.
- [19] Lisak E., Turlej Z. and Wasilewska M., „Concept of healthy lighting systems”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 8, pp. 190-192, 2008.
- [20] Aries M. B. C., *Human lighting demands: healthy lighting in an office environment*, Eindhoven: rozprawa doktorska, promotor: Begemann S.H.A., promotor pomocniczy: Tenner A.D., Technische Universiteit Eindhoven, 2005.
- [21] Figueiro M., Kalsher M., Steverson B. i Heerwagen J., „Circadian-effective light and its impact on alertness in office workers”, *Lighting Research & Technology*, tom 51, nr 2, pp. 171-183, 2018.
- [22] Konis K., „A novel circadian daylight metric for building design and evaluation”, *Building and Environment*, tom 113, pp. 22-38, 2017.
- [23] Dechnik M. i Grzywocz K., „Efektywność energetyczna sterowania oświetleniem wewnątrz”, *Napędy i Sterowanie*, nr 12, pp. 64-69, 2017.

- [24] Montoya F. G., Peña-García A., Juaidi A. i Manzano-Agugliaro F., „Indoor lighting techniques: An overview of evolution and new trends for energy saving”, *Energy and Buildings*, tom 140, pp. 50-60, 2017.
- [25] Weisbuch C., „Historical perspective on the physics of artificial lighting”, *Comptes Rendus Physique*, tom 19, nr 3, pp. 89-112, 2018.
- [26] Brox J., *Brilliant: The Evolution of Artificial Light*, New York: Houghton Mifflin Harcourt, 2010.
- [27] Chitnis C., Kalyani N. T., Swart H. C. i Dhoble S. J., „Escalating opportunities in the field of lighting”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, tom 64, pp. 727-748, 2016.
- [28] Zou H., Zhou Y., Jiang H., Chien S. C., Xie L. i Spanos C. J., „WinLight: A WiFi-based occupancy-driven lighting control system for smart building”, *Energy and Buildings*, tom 158, pp. 924-938, 2018.
- [29] Gentile N., Laike T. i Dubois M. C., „Lighting control systems in individual offices rooms at high latitude: Measurements of electricity savings and occupants’ satisfaction”, *Solar Energy*, tom 127, pp. 113-123, 2016.
- [30] *Poradnik inżyniera elektryka*, tom 3, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2011.
- [31] Grela J., *Analiza wpływu systemów automatyzacji na efektywność energetyczną instalacji i obiektów budowlanych*, Kraków: rozprawa doktorska, promotor: Marian Noga, promotor pomocniczy: Andrzej Ożadowicz, AGH, 2017.
- [32] Pabjańczyk W., „Energoozczędne instalacje oświetleniowe”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 6, pp. 65-72, 2010.
- [33] PN-EN 15232:2017 Energetyczne właściwości użytkowe budynków - Część 1: Wpływ automatyzacji, sterowania i technicznego zarządzania budynkami - Moduły M10 - 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10.
- [34] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/31/UE z dnia 19 maja 2010 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków, <http://eur-lex.europa.eu/>.
- [35] Pracki P., *Projektowanie oświetlenia wnętrza*, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2011.
- [36] Cierzniewski W., Kudła J., Paplicki P. i Wardach M., „Wybrane aspekty efektywnego projektowania instalacji oświetleniowych w obiektach użyteczności publicznej”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 12a, pp. 197-199, 2012.
- [37] Gordon G., *Interior Lighting for Designers*, 5th ed., John Wiley & Sons, 2015.
- [38] Ganslandt R. i Hofmann H., *Handbook of Lighting Design*, ERCO Edition, 1992.
- [39] DiLouie C., *Lighting Redesign for Existing Buildings*, River Publishers, 2011.
- [40] Pracki P., „Creating luminous environment in interior”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 8, pp. 154-157, 2008.
- [41] Rajecki K., „Projektowanie oświetlenia wczoraj i dziś”, *Pomiary Automatyka Robotyka*, nr 9, pp. 66-68, 2011.
- [42] Ochoa M. C. E, Aries M. B. C. i Hensen J. L. M., „State of the art in lighting simulation for building science: a literature review”, *Journal of Building Performance Simulation*, tom 5, nr 4, pp. 209-233, 2012.
- [43] Bean R., *Lighting: Interior and Exterior*, 2nd ed., Routledge Taylor & Francis Group, 2014.
- [44] Kocabey S. i Ekren N., „A new approach for examination of performance of interior lighting systems”, *Energy and Buildings*, tom 74, pp. 1-7, 2014.
- [45] Zakerian S. A., Yazdanirad S., Gharib S., Azam K. i Zare A., „The effect of increasing the illumination on operators’ visual performance in the control-room of a combined cycle power plant”, *Annals of Occupational and Environmental Medicine*, tom 30, nr 56, 2018.
- [46] Wolska A., „Zdolność widzenia a oświetlenie”, *Bezpieczeństwo Pracy nauka i praktyka*, tom 1, 1999.
- [47] de Bakker C., Aries M. B. C., Kort H. S. M. i Rosemann A. L. P., „Practical relevance of lighting control strategies in open-plan offices”, *INSide Information magazine TU/e*, nr 06/2016, pp. 16-17, 2016.
- [48] de Bakker C., Aries M., Kort H. i Rosemann A., „Occupancy-based lighting control in open-plan office spaces: A state-of-the-art review”, *Building and Environment*, tom 112, pp. 308-321, 2017.
- [49] Muhamad W. N. W., Zain M. Y. M., Wahab N., Aziz N. H. A. i Kadir R. A., „Energy Efficient Lighting System Design for Building”, *2010 International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation, Liverpool, UK*, pp. 282-286, 2010.

- [50] Chraibi S., Lashina T. A., Shrubsole P., Aries M. B. C., van Loenen E. J. i Rosemann A. L. P., „Satisfying light conditions: a field study on perception of consensus light in Dutch open office environments”, *Building and Environment*, tom 105, pp. 116-127, 2016.
- [51] Lashina T., Chraibi S., Despenic M., Shrubsole P., Rosemann A. i van Loenen E., „Sharing lighting control in an open office: Doing one's best to avoid conflict”, *Building and Environment*, tom 148, pp. 1-10, 2019.
- [52] Despenic M., Chraibi S., Lashina T. i Rosemann A., „Lighting preference profiles of users in an open office environment”, *Building and Environment*, tom 116, pp. 89-107, 2016.
- [53] Wen Y. J. i Agogino A. M., „Personalized dynamic design of networked lighting for energy-efficiency in open-plan offices”, *Energy and Buildings*, tom 43, nr 8, pp. 1919-1924, 2011.
- [54] Ríos V. L., Castañón V. R. H., Ochoa J. A. C. i Trinidad J. F. M., „Linear model optimizer vs Neural Networks: A comparison for improving the quality and saving of LED-Lighting control systems”, *2016 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR), IEEE, Cancun, Mexico*, pp. 2664-2669, 2016.
- [55] Bisegna F., Burattini C., Manganelli M., Martirano L., Mattoni B. i Parise L., „Adaptive control for lighting, shading and HVAC systems in near zero energy buildings”, *IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 7-10 June 2016, Florence, Italy*, 2016.
- [56] Dechnik M. i Moskwa S., „Smart House - inteligentny budynek - idea przyszłości”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 9, pp. 1-10, 2017.
- [57] Özçelik M. A., „The Design and Comparison of Central and Distributed Light Sensored Smart LED Lighting Systems”, *International Journal of Photoenergy*, 2018.
- [58] Manic M., Amarasinghe K., Rodriguez-Andina J. J. i Rieger C., „Intelligent Buildings of the Future: Cyberaware, Deep Learning Powered, and Human Interacting”, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, tom 10, nr 4, pp. 32-49, 2016.
- [59] Pe'rez-Lombard L., Ortiz J. i Pout C., „A review on buildings energy consumption”, *Energy and Buildings*, tom 40, pp. 394-398, 2008.
- [60] Costa A., Keane M. M., Torrens J. I. i Corry E., „Building operation and energy performance: Monitoring, analysis and optimisation toolkit”, *Applied Energy*, tom 101, pp. 310-316, 2013.
- [61] Zarębski T., „Możliwości implementacji systemów automatyki budynkowej w lokalnych sieciach energetycznych”, *Elektryka*, Tom 223-224, nr 3-4, 2012.
- [62] Saha A., Kuzlu M., Khamphanchai W., Pipattanasomporn M., Rahman S., Elma O., Selamogullari U. S., Uzunoglu M. i Yagcitekin B., „A home energy management algorithm in a smart house integrated with renewable energy”, *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe*, pp. 1-6, 2014.
- [63] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/27/UE z dnia 25 października 2012 r. w sprawie efektywności energetycznej, <http://eur-lex.europa.eu/>.
- [64] Kaźmierczak J. i Paś J., „Zużycie energii elektrycznej w nowoczesnym gospodarstwie domowym”, *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 12, pp. 18-21, 2011.
- [65] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/844 z dnia 30 maja 2018 r. zmieniająca dyrektywę 2010/31/UE w sprawie charakterystyki energetycznej budynków i dyrektywę 2012/27/UE w sprawie efektywności energetycznej, <http://eur-lex.europa.eu/>.
- [66] Zarębski T., „Możliwości zastosowania inteligentnych instalacji elektrycznych w nowoczesnym budownictwie”, *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 8, pp. 34-36, 2012.
- [67] Ippolito M. G., Sanseverino E. R. i Zizzo G., „Impact of building automation control systems and technical building management systems on the energy performance class of residential buildings: An Italian case study”, *Energy and Buildings*, tom 69, pp. 33-40, 2014.
- [68] Liang X., Hong T. i Shen G. Q., „Occupancy data analytics and prediction: A case study”, *Building and Environment*, tom 102, pp. 179-192, 2016.
- [69] Masoso O. T. i Grobler L. J., „The dark side of occupants' behaviour on building energy use”, *Energy and Buildings*, tom 42, nr 2, pp. 173-177, 2010.
- [70] Heydarian A., Pantazis E., Carneiro J. P., Gerber D. i Becerik-Gerber B., „Lights, building, action: Impact of default lighting settings on occupant behaviour”, *Journal of Environmental Psychology*, tom 48, pp. 212-223, 2016.
- [71] Sadeghi S. A., Karava P., Konstantzos I. i Tzempelikos A., „Occupant interactions with shading and lighting systems using different control interfaces: A pilot field study”, *Building and Environment*, tom 97, pp. 177-195, 2016.

- [72] Yan D., O'Brien W., Hong T., Feng X., Gunay H. B., Tahmasebi F. i Mahdavi A., „Occupant behavior modeling for building performance simulation: Current state and future challenges”, *Energy and Buildings*, tom 107, pp. 264-278, 2015.
- [73] Delzendeh E., Wu S., Lee A. i Zhou Y., „The impact of occupants' behaviours on building energy analysis: A research review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, tom 80, pp. 1061-1071, 2017.
- [74] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.
- [75] Yun G. Y., Kim H. i Kim J. T., „Effects of occupancy and lighting use patterns on lighting energy consumption”, *Energy and Buildings*, tom 46, nr 152–158, 2012.
- [76] Yun G. Y., Kong H. J., Kim H. i Kim J. T., „A field survey of visual comfort and lighting energy consumption in open plan offices”, *Energy and Buildings*, tom 46, pp. 146-151, 2012.
- [77] Galasiu A. D. i Veitch J. A., „Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylit offices: a literature review”, *Energy and Buildings*, tom 38, nr 7, pp. 728-742, 2006.
- [78] da Silva P. C., Leal C. i Andersen M., „Occupants interaction with electric lighting and shading systems in real single-occupied offices: Results from a monitoring campaign”, *Building and Environment*, tom 64, pp. 152-168, 2013.
- [79] Reinhart C. i Voss K., „Monitoring manual control of electric lighting and blinds”, *Lighting Research & Technology*, tom 35, nr 3, pp. 243–258, 2003.
- [80] Cheng Z., Zhao Q., Wang F., Jiang Y., Xia L. i Ding J., „Satisfaction based Q-learning for integrated lighting and blind control”, *Energy and Buildings*, tom 127, pp. 43-55, 2016.
- [81] 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, pp. 231-239, 1997.
- [82] Pracki P., „Efektywność energetyczna oświetlenia obiektów użyteczności publicznej”, *Przegląd Elektrotechniczny*, tom 85, nr 9, pp. 328-331, 2009.
- [83] Xu L., Pan Y., Yao Y., Cai D., Huang Z. i Linder N., „Lighting energy efficiency in offices under different control strategies”, *Energy and Buildings*, tom 138, pp. 127-139, 2017.
- [84] Wantuch A. i Janowski M., „Elektryczne źródła światła - wpływ na zdrowie człowieka”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 3, pp. 173-176, 2016.
- [85] Lowry G., „Energy saving claims for lighting controls in commercial buildings”, *Energy and Buildings*, tom 133, pp. 489-497, 2016.
- [86] Gentile N., *Lighting Control Systems to Save Energy in the non-Residential Sector: State-of-the-art, Field Studies, and Simulations*, Lund: Lund University, 2017.
- [87] Dubois M. C. i Blomsterberg Å., „Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: A literature review”, *Energy and Buildings*, tom 43, nr 10, pp. 2572-2582, 2011.
- [88] Ożadowicz A., *Analiza porównawcza dwóch systemów sterowania inteligentnym budynkiem: systemu europejskiego EIB/KNX oraz standardu amerykańskiego na bazie technologii Lon Works*, Kraków: rozprawa doktorska, promotor: Zbigniew Hanzelka, AGH, 2007.
- [89] Niezabitowska E. i Mikulik J., *Budynek inteligentny, Tom II Podstawowe systemy bezpieczeństwa w budynkach inteligentnych*, Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2014.
- [90] Klajn A., „Wybrane aspekty integracji systemów inteligentnych instalacji w budynkach”, *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 10, pp. 29-33, 2010.
- [91] Markiewicz H., *Instalacje elektryczne*, wyd. VI, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo–Techniczne, 2005.
- [92] Ghaffarianhoseini A., Berardi U., AlWaer H., Chang S., Halawa E., Ghaffarianhoseini A. i Clements-Croome D., „What is an intelligent building? Analysis of recent interpretations from an international perspective”, *Architectural Science Review*, tom 59, nr 5, pp. 338-357, 2016.
- [93] Niezabitowska E. et al., *Budynek inteligentny, Tom I Potrzeby użytkownika, a standard budynku inteligentnego*, Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2010.
- [94] Li J., Zhang Y. i Kuang F., „Intelligent Building Automation and Control Based on IndasIBMS”, *2013 International Conference on Service Sciences (ICSS)*, pp. 266-270, 2013.
- [95] Wang S., *Intelligent Buildings and Building Automation*, Taylor & Francis, 2009.

- [96] Shao H. i Fu H., „Design and Implementation of Intelligent Building Engineering Information Management System”, *Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2014 7th International Conference on*, pp. 158-161, 2014.
- [97] Szász Cs. i Husi G., „The intelligent building definition: a central-european approach”, *System Integration (SII), 2014 IEEE/SICE International Symposium on*, pp. 216-221, 2014.
- [98] Mikulik J. et. al., *Inteligentne budynki - informacja i bezpieczeństwo*, Kraków: Wydawnictwo LIBRON, 2016.
- [99] Mikulik J. et al., *Inteligentne budynki: nowe możliwości działania*, Kraków: Wydawnictwo Libron, 2014.
- [100] Tadeusiewicz R., „Inteligencja "inteligentnego budynku" i możliwości jej weryfikacji”, *Napędy i Sterowanie*, nr 12, pp. 76-80, 2014.
- [101] Zarębski T., „Integracja alternatywnych źródeł energii z inteligentnymi instalacjami elektrycznymi”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 7, pp. 186-188, 2008.
- [102] Ożadowicz A., „Systemy automatyki budynkowej jako element inteligentnych sieci elektroenergetycznych – Smart Metering i aktywny odbiorca”, *Napędy i Sterowanie*, nr 12, pp. 52-55, 2013.
- [103] Hurtado L. A., Nguyen P. H., Kling W. L. i Zeiler W., „Building Energy Management Systems — Optimization of comfort and energy use”, *Power Engineering Conference (UPEC), 2013 48th International Universities'*, pp. 1-6, 2013.
- [104] Kordík P., Hasaj M., Tvrđý M. i Šnorek M., „Building Automation Simulator and Control Strategy for Intelligent and Energy Efficient Home”, *Third UKSim European Symposium on Computer Modeling and Simulation, Athens, Greece*, pp. 154-159, 2009.
- [105] Fabi V., Spigliantini G. i Corgnati S. P., „Insights on Smart Home Concept and Occupants' Interaction with Building Controls”, *Energy Procedia*, tom 111, pp. 759-769, 2017.
- [106] Noga M., Ożadowicz A. i Grela J., „Efektywność energetyczna i Smart Metering – nowe wyzwania dla systemów automatyki budynkowej”, *Napędy i Sterowanie*, nr 12, pp. 54-59, 2012.
- [107] Pamuła A. i Papińska-Kacperek J., „Inteligentne domy i i inteligentne sieci energetyczne jako element infrastruktury Smart City”, *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego, Studia Informatica*, nr 29, pp. 57-69, 2012.
- [108] Bakker L. G., Hoes-van Oeffelen E. C. M., Loonen R. C. G. M. i Hensen J. L. M., „User satisfaction and interaction with automated dynamic facades: A pilot study”, *Building and Environment*, tom 78, pp. 44-52, 2014.
- [109] Cole R. J. i Brown Z., „Reconciling human and automated intelligence in the provision of occupant comfort”, *Intelligent Buildings International*, tom 1, nr 1, pp. 39-55, 2009.
- [110] Veitch J. A., Newsham G. R., Boyce P. R. i Jones C. C., „Lighting appraisal, well-being, and performance in open-plan offices: A linked mechanisms approach”, *Lighting Research & Technology*, tom 40, nr 2, pp. 133-151, 2008.
- [111] Nagy Z., Yong F. Y., Frei M. i Schlueter A., „Occupant centered lighting control for comfort and energy efficient building operation”, *Energy and Buildings*, tom 94, nr 1, pp. 100-108, 2015.
- [112] Nagy Z., Yong F. Y. i Schlueter A., „Occupant centered lighting control: A user study on balancing comfort, acceptance, and energy consumption”, *Energy and Buildings*, tom 126, pp. 310-322, 2016.
- [113] Park J. Y., Dougherty T., Fritz H. i Nagy Z., „LightLearn: An adaptive and occupant centered controller for lighting based on reinforcement learning”, *Building and Environment*, tom 147, pp. 397-414, 2019.
- [114] Naylor S., Gillott M. i Lau T., „A review of occupant-centric building control strategies to reduce building energy use”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, tom 96, pp. 1-10, 2018.
- [115] Kalvelage K. i Dorneich M., „A User-Centered Approach to User-Building Interactions”, *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, tom 58, 2014.
- [116] Teslyuk V., Denysyuk P., Beregovska K. i Mashevska M., „Method of development Smart-House-Systems Models, based on Petri-Markov Nets, and extended by functional components”, *12th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine*, pp. 352-355, 2017.
- [117] Romańska-Zapała 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, pp. 397-417, 2018.

- [118] Aghemo C., Blaso L. i Pellegrino A., „Building automation and control systems: A case study to evaluate the energy and environmental performances of a lighting control system in offices”, *Automation in Construction*, tom 43, pp. 10-22, 2014.
- [119] Pabjańczyk W., „Inteligentne instalacje oświetlenia wewnątrz w kontekście zmian normy PN-EN 12464-1. Cz. 1”, *Elektro Info*, nr 1-2, pp. 60-62, 2014.
- [120] Imam M. H. T., Afshari S. i Mishra S., „Smart Lighting Control Systems”, w *Intelligent Building Control Systems: A Survey of Modern Building Control*, Springer International Publishing, 2018, pp. 221-251.
- [121] Wolska A., „Inteligentny system sterowania oświetleniem - przykłady rozwiązań i zastosowań”, *Bezpieczeństwo Pracy: nauka i praktyka*, nr 2, pp. 14-17, 2006.
- [122] Parol M., „Instalacje w "Inteligentnych Budynkach"”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 10, pp. 1-5, 2006.
- [123] Mikulik J., Wybrane zagadnienia zapewnienia bezpieczeństwa i komfortu w budynkach, Kraków: Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, 2008.
- [124] EMEA SMART House, „Kompleksowe rozwiązania automatyki Inteligentnego budynku”, <http://emeagateway.eu/>, dostęp: 24 stycznia 2017 r.
- [125] King J. i Perry C., „Smart Buildings: Using Smart Technology to Save Energy in Existing Buildings”, American Council for an Energy-Efficient Economy, Waszyngton, USA, 2017.
- [126] Bannamas S. i Jirapong P., „An intelligent lighting energy management system for commercial and residential buildings”, *Smart Grid Technologies – Asia (ISGT ASIA), 2015 IEEE Innovative*, pp. 1-6, 2015.
- [127] Newsham G. i Veitch J., „Lighting quality recommendations for VDT offices: a new method of derivation”, *Transactions of the Illuminating Engineering Society*, tom 33, nr 2, pp. 97–113, 2001.
- [128] Rossi M., Pandharipande A., Caicedo D., Schenato L. i Cenedese A., „Personal lighting control with occupancy and daylight adaptation”, *Energy and Buildings*, tom 105, pp. 263-272, 2015.
- [129] Pawlak A., „Lighting of working places for people with moderately poor sight”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 10, pp. 233-237, 2010.
- [130] Lindelof D. i Morel N., „A field investigation of the intermediate light switching by users”, *Energy and Buildings*, tom 38, pp. 790-801, 2006.
- [131] Pracki P., „Preferencje użytkowników oświetlonego wnętrza w zakresie barwy światła”, *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 11, pp. 11-14, 2004.
- [132] Yingming G., Mingdong X., Huanyue Z., Xu G., Ping L. i Nianyu Z., „Study on distributed individuation lighting model and analysis to energy consumption character”, *Energy and Buildings*, Tom 151, pp. 45-52, 2017.
- [133] Ari S., Wilcoxon P., Khalifa H. E., Dannenhoffer J. F. i Isik C., „A practical approach to individual thermal comfort and energy optimization problem”, *2008 Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society, New York City, NY, USA*, 2008.
- [134] Eleni V. S. i Groumpos P. P., „A review on Zero Energy Buildings and Intelligent Systems”, *Information, Intelligence, Systems and Applications (IISA), 2015 6th International Conference on*, 2015.
- [135] Sun B., Luh P. B., Jia Q. S., Jiang Z., Wang F. i Song C., „Building Energy Management: Integrated Control of Active and Passive Heating, Cooling, Lighting, Shading, and Ventilation Systems”, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, tom 10, nr 3, pp. 588-602, 2013.
- [136] Ożadowicz A. i Grela J., „An event-driven building energy management system enabling active demand side management”, *2016 Second International Conference on Event-based Control, Communication, and Signal Processing (EBCCSP), IEEE, Kraków*, 2016.
- [137] Manic M., Wijayasekara D., Amarasinghe K. i Rodriguez-Andina J. J., „Building Energy Management Systems: The Age of Intelligent and Adaptive Buildings”, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, tom 10, nr 1, pp. 25-39, 2016.
- [138] Papantoniou S., Kolokotsa D., Kalaitzakis K., Cesarini D. N., Cubi E. i Cristalli C., „Adaptive lighting controllers using smart sensors”, *International Journal of Sustainable Energy*, tom 35, nr 6, pp. 537-553, 2016.
- [139] Horyński M., „Zastosowanie sieci o inteligencji rozproszonej w celu optymalizacji zużycia energii we współczesnych budynkach”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 4, pp. 293-295, 2013.
- [140] Firląg S., Poradnik inwestora: budując z głową buduję energooszczędnie, Warszawa: Fundacja Ziemia i Ludzie, 2014.

- [141] Wicaksono H., Rogalski S. i Kusnady E., „Knowledge-based intelligent energy management using building automation system”, *IPEC, 2010 Conference Proceedings*, 2010.
- [142] Yang I. H. i Nam E. J., „Economic analysis of the daylight-linked lighting control system in office buildings”, *Solar Energy*, tom 84, nr 8, pp. 1513-1525, 2010.
- [143] Almeida A. M. i Martins A. G., „Efficient lighting in buildings: The lack of legislation in Portugal”, *Energy Policy*, tom 67, pp. 82-86, 2014.
- [144] Attia S., Hamdy M. i Ezzeldin S., „Twenty-year tracking of lighting savings and power density in the residential sector”, *Energy and Buildings*, tom 154, pp. 113-126, 2017.
- [145] Guo X., Tiller D. K., Henze G. P. i Waters C. E., „The performance of occupancy-based lighting control systems: A review”, *Lighting Research & Technology*, tom 42, nr 4, pp. 415-431, 2010.
- [146] Shishegar N. i Boubekri M., „Quantifying electrical energy savings in offices through installing daylight responsive control systems in hot climates”, *Energy and Buildings*, tom 153, pp. 87-98, 2017.
- [147] Salata F., Vollaro A. de L. i Ferraro A., „An economic perspective on the reliability of lighting systems in building with highly efficient energy: A case study”, *Energy Conversion and Management*, tom 84, pp. 623-632, 2014.
- [148] Wang X., Tjalkens T. i Linnartz J. P., „Smart office lighting control using occupancy sensors”, *IEEE 14th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC), 16-18 V 2017, Calabria, Italy*, 2017.
- [149] Chew I., Kalavally V., Oo N. W. i Parkkinen J., „Design of an energy-saving controller for an intelligent LED lighting system”, *Energy and Buildings*, tom 120, pp. 1-9, 2016.
- [150] Byun J., Hong I., Lee B. i Park S., „Intelligent household led lighting system considering energy efficiency and user satisfaction”, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, tom 59, nr 1, pp. 70-76, 2013.
- [151] de Rubeis T., Muttillio M., Pantoli L., Nardi I., Leone I., Stornelli V. i Ambrosini D., „A first approach to universal daylight and occupancy control system for any lamps: Simulated case in an academic classroom”, *Energy and Buildings*, tom 152, pp. 24-39, 2017.
- [152] Görgülü S. i Ekren N., „Energy saving in lighting system with fuzzy logic controller which uses light-pipe and dimmable ballast”, *Energy and Buildings*, tom 61, pp. 172-176, 2013.
- [153] Salata F., Golasi I., Falanga G., Allegri M., Vollaro E. L., Nardecchia F., Pagliaro F., Gugliermetti F. i Vollaro A. L., „Maintenance and Energy Optimization of Lighting Systems for the Improvement of Historic Buildings: A Case Study”, *Sustainability*, tom 7, nr 8, pp. 10770-10788, 2015.
- [154] Gago E. J., Muneer T., Knez M. i Köster H., „Natural light controls and guides in buildings. Energy saving for electrical lighting, reduction of cooling load”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, tom 41, pp. 1-13, 2015.
- [155] Yun G., Yoon K. C. i Kim K. S., „The influence of shading control strategies on the visual comfort and energy demand of office buildings”, *Energy and Buildings*, tom 84, pp. 70-85, 2014.
- [156] Ryckaert W. R., Lootens S., Geldof J. i Hanselaer P., „Criteria for energy efficient lighting in buildings”, *Energy and Buildings*, tom 42, nr 3, pp. 341-347, 2010.
- [157] Imam M. H. T., Afshari S. i Mishra S., „An experimental survey of feedback control methodologies for advanced lighting systems”, *Energy and Buildings*, tom 130, pp. 600-612, 2016.
- [158] Colohan A., Teehan J., Sunderland K., Barrett M. i Preston J., „Digital energy networks: A post occupancy evaluation and appraisal of an Intelligent Low Energy Lighting System”, *2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Stoke on Trent, UK*, 2015.
- [159] Husen S. A., Pandharipande A., Tolhuizen L. T., Wang T. i Zhao M., „Lighting systems control for demand response”, *2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), Washington, DC, USA*, 2012.
- [160] Yu X. i Su Y., „Daylight availability assessment and its potential energy saving estimation – A literature review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, tom 52, pp. 494-503, 2015.
- [161] Ahn B. L., Jang C. Y., Leigh S. B., Yoo S. i Jeong H., „Effect of LED lighting on the cooling and heating loads in office buildings”, *Applied Energy*, tom 113, pp. 1484-1489, 2014.
- [162] Baloch A. A., Skaikh P. H., Skaikh F., Leghari Z. H., Mirjat N. H. i Uqaili M. A., „Simulation tools application for artificial lighting in buildings”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, tom 82, pp. 3007-3026, 2018.
- [163] Liu J., Zhang W., Chu X. i Liu Y., „Fuzzy logic controller for energy savings in a smart LED lighting system considering lighting comfort and daylight”, *Energy and Buildings*, tom 127, pp. 95-104, 2016.

- [164] Panjaitan S. D. i Hartoyo A., „A Lighting Control System in Buildings based on Fuzzy Logic”, *TELKOMNIKA (Telecommunication, Computing, Electronics and Control)*, tom 8, nr 3, pp. 423-432, 2011.
- [165] Yin C., Dadras S., Huang X., Mei J., Malek H. i Chenga Y., „Energy-saving control strategy for lighting system based on multivariate extremum seeking with Newton algorithm”, *Energy Conversion and Management*, tom 142, pp. 504-522, 2017.
- [166] Delvaeye R., Ryckaert W., Stroobant L., Hanselaer P., Klein R. i Breesch H., „Analysis of energy savings of three daylight control systems in a school building by means of monitoring”, *Energy and Buildings*, tom 127, pp. 969-979, 2016.
- [167] Martirano L., „A smart lighting control to save energy”, *Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems*, tom 1, pp. 132-138, 2011.
- [168] Haq M. A., Hassan M. Y., Abdullah H., Rahman H. A., Abdullah M. P., Hussin F. i Said D. M., „A review on lighting control technologies in commercial buildings, their performance and affecting factors”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, tom 33, pp. 268-279, 2014.
- [169] Madias E. N. D., Kontaxis P. A. i Topalis F. V., „Application of multi-objective genetic algorithms to interior lighting optimization”, *Energy and Buildings*, tom 125, pp. 66-74, 2016.
- [170] Shen E., Hu J. i Patel M., „Energy and visual comfort analysis of lighting and daylight control strategies”, *Building and Environment*, tom 78, pp. 155-170, 2014.
- [171] Plebe A. i Pavone M., „Multi-objective Genetic Algorithm for Interior Lighting Design”, *Machine Learning, Optimization, and Big Data, Third International Conference, MOD 2017, Volterra, Italy*, 2017.
- [172] Wang Z. i Tan Y. K., „Illumination control of LED systems based on neural network model and energy optimization algorithm”, *Energy and Buildings*, tom 62, pp. 514-521, 2013.
- [173] Miki M., Asayama E. i Hiroyasu T., „Intelligent Lighting System using Visible-Light Communication Technology”, *IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, 7-9 VI 2006, Bangkok, Thailand*, 2006.
- [174] Raziie S. A. i Mohscnian-Had H., „Optimal demand response capacity of automatic lighting control”, *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 24-27 II 2013, Washington, DC, USA*, 2013.
- [175] Konis K., „Evaluating daylighting effectiveness and occupant visual comfort in a side-lit open-plan office building in San Francisco, California”, *Building and Environment*, tom 59, pp. 662-677, 2013.
- [176] Lobato-Ríos V., Rocío Hernández-Castañón del V., Carrasco-Ochoa J. A. i Martínez-Trinidad J. F., „Linear model optimizer vs Neural Networks: A comparison for improving the quality and saving of LED-Lighting control systems”, *2016 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 4-8 Dec. 2016, Cancun, Mexico*, pp. 2664-2669, 2016.
- [177] Krarti M., *Energy audit of building systems: an engineering approach*, Boca Raton, USA: CRC Press, 2000.
- [178] Erickson P. M. i Hillman T. C., „A simplified method to estimate energy savings of artificial lighting use from daylighting”, *Building and Environment*, tom 40, nr 6, pp. 747-754, 2005.
- [179] Lim G. H., Keumala N. i Ghafar N. A., „Energy saving potential and visual comfort of task light usage for offices in Malaysia”, *Energy and Buildings*, tom 147, pp. 166-175, 2017.
- [180] Li D. H. W., Cheung A. C. K., Chow S. K. H. i Lee E. W. M., „Study of daylight data and lighting energy savings for atrium corridors with lighting dimming controls”, *Energy and Buildings*, tom 72, pp. 457-464, 2014.
- [181] Li D. H. W., Lam T. N. T. i Wong S. L., „Lighting and energy performance for an office using high frequency dimming controls”, *Energy Conversion and Management*, tom 47, pp. 1133-1145, 2006.
- [182] Li D. H. W. i Lam J. C., „Evaluation of lighting performance in office buildings with daylighting controls”, *Energy and Buildings*, tom 33, nr 8, pp. 793-803, 2001.
- [183] Kang G., Kang K. i Song D., „Optimized Blind Control Method to Minimize Heating, Cooling and Lighting Energy”, *Energy Procedia*, tom 78, pp. 2857-2862, 2015.
- [184] Pandharipande A. i Caicedo D., „Daylight integrated illumination control of LED Systems based on enhanced presence sensing”, *Energy and Buildings*, tom 43, p. 944-950, 2011.
- [185] Pandharipande A. i Caicedo D., „Smart indoor lighting systems with luminaire-based sensing: A review of lighting control approaches”, *Energy and Buildings*, tom 104, pp. 369-377, 2015.

- [186] Fontoynt M., Ramanarivo K., Soreze T., Fernez G. i Skov K. G., „Economic feasibility of maximising daylighting of a standard office building with efficient electric lighting”, *Energy and Buildings*, tom 110, pp. 435-442, 2016.
- [187] Baniya R., Maksimainen M., Sierla S., Pang S., Yang C. W. i Vyatkin W., „Smart indoor lighting control: Power, illuminance, and colour quality”, *Industrial Electronics (ISIE), 2014 IEEE 23rd International Symposium on, 1-4 June 2014*, 2014.
- [188] Yun G. i Kim K. S., „An empirical validation of lighting energy consumption using the integrated simulation method”, *Energy and Buildings*, tom 57, pp. 144-154, 2013.
- [189] Wang C., Yan D. i Ren X., „Modeling Individual's Light Switching Behavior to Understand Lighting Energy Use of Office Building”, *Energy Procedia*, tom 88, pp. 781-787, 2016.
- [190] Leephakpreeda T., „Adaptive Occupancy-based Lighting Control via Grey Prediction”, *Building and Environment*, tom 40, nr 7, pp. 881-886, 2005.
- [191] Bodart M. i De Herde A., „Global energy savings in offices buildings by the use of daylighting”, *Energy and Buildings*, tom 34, nr 5, pp. 421-429, 2002.
- [192] Bertoldi P., Hirl B. i Labanca N., „Energy Efficiency Status Report 2012 - Electricity Consumption and Efficiency Trends in the EU-27”, <https://setis.ec.europa.eu/sites/default/files/reports/energy-efficiency-status-report-2012.pdf>, dostęp: 22 II 2018 r., 2012.
- [193] Yu Z. J., Haghghat F., Fung B. C. M. i Morofsky E., „A methodology for identifying and improving occupant behavior in residential buildings”, *Energy*, tom 36, nr 11, pp. 6596-6608, 2011.
- [194] Makaremi N., Schiavoni S., Pisello A. L., Asdrubali F. i Cotana F., „Quantifying the effects of interior surface reflectance on indoor lighting”, *Energy Procedia*, tom 134, pp. 306-316, 2017.
- [195] Gentile N. i Dubois M. C., „Field data and simulations to estimate the role of standby energy use of lighting control systems in individual offices”, *Energy and Buildings*, tom 155, pp. 390-403, 2017.
- [196] PN-EN 15193:2010 Charakterystyka energetyczna budynków - Wymagania energetyczne dotyczące oświetlenia.
- [197] Zissis G., Kitsinelis S., Arexis-Boisson L., Martinsons C., Boulenguez P. i Carré S., „LEDs and Solid-State Lighting: the potential health issues”, *7th International Conference on Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting (EEDAL'13), Coimbra*, 2013.
- [198] Cadler E. i Herlender K., „Oprawy oświetlenia zewnętrznego z półprzewodnikowymi źródłami światła LED”, *Wiadomości Elektrotechniczne*, tom 78, nr 10, pp. 17-20, 2010.
- [199] Kandasamy N. K., Karunakaran G., Spanos C., Tseng K. J. i Soong B. H., „Smart lighting system using ANN-IMC for personalized lighting control and daylight harvesting”, *Building and Environment*, tom 139, pp. 170-180, 2018.
- [200] Pawlak A., „Nauka o pracy - bezpieczeństwo, higiena, ergonomia: Oświetlenie elektryczne”, http://nop.ciop.pl/m6-7/m6-7_4.htm, dostęp: 24 czerwca 2019 r.
- [201] Fryc I., Fryc J., Jakubowski P. i Wąsowski K. A., „Techniczne aspekty bezpieczeństwa fotobiologicznego źródeł światła, stosowanych do użytku domowego, z uwzględnieniem zagadnień medyczno-prawnych”, *Przegląd Elektrotechniczny*, tom 93, nr 3, pp. 232-237, 2017.
- [202] Aman M. M., Jasmon G. B., Mokhlis H. i Bakar A. H. A., „Analysis of the performance of domestic lighting lamps”, *Energy Policy*, tom 52, pp. 482-500, 2013.
- [203] LED Engin (OSRAM), <http://www.ledengin.com/products/gallerywhite>, dostęp: 30 grudnia 2020 r.
- [204] Principi P. i Fioretti R., „A comparative life cycle assessment of luminaires for general lighting for the office – compact fluorescent (CFL) vs Light Emitting Diode (LED) – a case study”, *Journal of Cleaner Production*, tom 83, pp. 96-107, 2014.
- [205] Karunatilaka D., Zafar F., Kalavally V. i Parthiban R., „LED Based Indoor Visible Light Communications: State of the Art”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, tom 17, nr 3, pp. 1649-1678, 2015.
- [206] US Department of Energy i Pacific Northwest National Laboratory, CALiPER Retail Lamps Study 3.1: Dimming, Flicker and Power Quality Characteristics of LED A Lamps, 2014.
- [207] Nardelli A., Deuschle E., de Azevedo L. D., Pessoa J. L. N. i Ghisi E., „Assessment of Light Emitting Diodes technology for general lighting: A critical review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, tom 75, pp. 368-379, 2017.
- [208] Kukacka L., Power quality in DC supplied grids: application to lighting networks, rozprawa doktorska, Université Paul Sabatier - Toulouse III, Technical University of Liberec, 2018.
- [209] Czyżewski D., „Oprawy oświetlenia drogowego ze źródłami światła typu LED”, *Przegląd Elektrotechniczny*, tom 85, nr 11, pp. 283-288, 2009.

- [210] Łączny P., Seredyński P., Chmielowiec K. i Butryn W., „Analiza wpływu temperatury na pracę różnych rodzajów źródeł światła z zakresu profesjonalnej techniki świetlnej”, *Przegląd Elektrotechniczny*, tom 93, nr 6, pp. 119-124, 2017.
- [211] Tabaka P. i Rozga P., „Assessment of methods of marking LED sources with the power of equivalent light bulb”, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, tom 65, nr 6, pp. 883-890, 2017.
- [212] Trevisanello L., Meneghini M., Mura G., Vanzi M., Pavesi M., Meneghesso G. i Zanoni E., „Accelerated Life Test of High Brightness Light Emitting Diodes”, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, tom 8, nr 2, pp. 304-311, 2008.
- [213] Lange A. i Pasko M., „Wpływ pracy LED-owych źródeł światła na parametry określające jakość energii elektrycznej, część 1”, *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, tom 93, pp. 37-52, 2018.
- [214] Pabjańczyk W., Sikora R., Markiewicz P. i Gabryjelski Z., „Wpływ opraw drogowych LED na jakość energii w sieciach elektroenergetycznych”, *Przegląd Elektrotechniczny*, tom 87, nr 4, pp. 120-123, 2011.
- [215] Pentiu R. D., Popa C. D., Dascălu A. i Atănăsoae P., „The influence of LED Street lighting upon power quality in electrical networks”, *International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), 16-18 X 2014, Iasi, Romania*, 2014.
- [216] Oliveira G. S., Oliveira E. P., Silva S. P. i Carvalho C. C. M. M., „Power quality of LED lamps”, *17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 16-19 X 2016, Belo Horizonte, Brazil*.
- [217] Sikora R. i Markiewicz P., „Wpływ nowoczesnych opraw oświetleniowych na sieć zasilającą”, *Przegląd Elektrotechniczny*, tom 86, nr 6, pp. 61-64, 2010.
- [218] Dzienis W. i Fryc I., „Wpływ rodzaju zasilacza LEDowej oprawy oświetleniowej na poziom generowanych przez nią zaburzeń do sieci zasilającej”, *Przegląd Elektrotechniczny*, tom 88, nr 4a, pp. 215-216, 2012.
- [219] Doulos L. T., Tsangrassoulis A., Kontaxis P. A., Kontadakis A. i Topalis F. V., „Harvesting daylight with LED or T5 fluorescent lamps? The role of dimming”, *Energy and Buildings*, tom 140, pp. 336-347, 2017.
- [220] Michalak J. i Zygmantowski M., „Przekształtniki energoelektroniczne w EP”, *Biblioteka Źródłowa Energetyki Prosumenckiej*.
- [221] Rensselaer Polytechnic Institute, „Does dimming LEDs decrease their lamp life?”, <http://www.lrc.rpi.edu/programs/nlpip/lightinganswers/led/dimmingLampLife.asp>, 2003.
- [222] Wagiman K. R. i Abdullah M. N., „Intelligent Lighting Control System for Energy Savings in Office Building”, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, tom 11, nr 1, pp. 195-202, 2018.
- [223] Parise L., Lamonaca F. D. L. i Carnì D. L., „Interior lighting control system: A practical case using daylight harvesting control strategy”, *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Rome, Italy*, pp. 719-724, 2015.
- [224] Parise G., Martirano L. i Parise L., „A Procedure to Estimate the Energy Requirements for Lighting”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, tom 52, nr 1, pp. 34-41, 2016.
- [225] Romańska-Zapała A., „Zintegrowane systemy sterowania procesami w obiektach budowlanych”, *Materiały Budowlane*, nr 5, pp. 115-116, 2014.
- [226] Domingues P., Carreira P., Vieira R. i Kastner W., „Building automation systems: Concepts and technology review”, *Computer Standards & Interfaces*, tom 45, pp. 1-12, 2016.
- [227] Tridonic GmbH & Co KG, DALI manual, 2013.
- [228] Jabłoński A., „Zadania integracji systemów w budynkach inteligentnych”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 7, pp. 182-185, 2008.
- [229] Syposz J. i Jadwiszczak P., „Integracja systemu BMS zarządzającego instalacjami i energią w istniejącym budynku uczelni technicznej”, *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, nr 5, pp. 22-26, 2006.
- [230] Parol M. i Domżała D., „Integracja i zarządzanie źródłami generacji rozproszonej w budynku mieszkalnym z zastosowaniem systemu KNX”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 2, pp. 157-162, 2011.
- [231] Srocza E., „Algorytmy projektowania instalacji w budynkach inteligentnych”, *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 5, pp. 24-30, 2007.
- [232] Parol M. i Romanik T., „Monitoring i zdalne sterowanie instalacjami KNX TP za pośrednictwem telefonii komórkowej”, *Przegląd Elektrotechniczny*, tom 86, nr 5, pp. 19-23, 2010.

- [233] Parol M., Michalski Ł. i Molik Ł., „Monitoring i zdalne sterowanie instalacjami KNX za pośrednictwem Internetu”, *Przegląd Elektrotechniczny*, tom 73, nr 7-8, pp. 6-9, 2007.
- [234] Grela J., „Konceptcja organizacji systemów zarządzania energią w sieciach automatyki budynkowej”, *Napędy i Sterowanie*, nr 12, pp. 81-87, 2014.
- [235] Zhang L., Liu B., Tang W. i Wu L., „The development and technological research of intelligent electrical building”, *2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, pp. 88-92, 2014.
- [236] Acone M., Romano R., Piccolo A., Siano P., Loia F., Ippolito M. G. i Zizzo G., „Designing an Energy Management System for smart houses”, *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015 IEEE 15th International Conference on*, pp. 1677-1682, 2015.
- [237] Romańska-Zapała A., Bomberg M. i Yarbrough D. W., „Buildings with environmental quality management: Part 4: A path to the future NZEB”, *Journal of Building Physics*, tom 43, nr 1, pp. 3-21, 2019.
- [238] Kwasnowski P. i Fedorczyk-Cisak M., „Wpływ zintegrowanych systemów automatyki na efektywność energetyczną budynków w świetle normy PN-EN 15232”, w *Fizyka budowli w teorii i praktyce*, pod red. Klemm P., Heim D., Klemm K., Wojtczak M., Łódź, Instytut Fizyki Budowli Katarzyna i Piotr Klemm S.C., 2013, pp. 53-58.
- [239] Borkowski P., Pawłowski M. i Mazur Ł., „Systemy zarządzania budynkiem (HMS/BMS) wpływające na energooszczędność budynku”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 6, pp. 57-60, 2010.
- [240] Lee D. i Cheng C. C., „Energy savings by energy management systems: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, tom 56, pp. 760-777, 2016.
- [241] Cheng C. C. i Lee D., „Return on investment of building energy management system: A review”, *International Journal of Energy Research*, tom 10, pp. 4034-4053, 2018.
- [242] Jankowska E., Kondej D. i Pośniak M., „Subiektywna ocena jakości środowiska pracy w pomieszczeniach biurowych”, *Medycyna Pracy*, tom 54, pp. 437-444, 2003.
- [243] Hanzelka Z., „Wahania napięcia”, *Automatyka, elektryka, zakłócenia*, nr 5, pp. 6-22, 2011.
- [244] De Keulenaer H., „Wprowadzenie - Poradnik samodzielnej oceny jakości zasilania”, w *Jakość zasilania - poradnik*, Europejski Instytut Miedzi, 2002.
- [245] Bąk J., „O wynikach badań dotyczących bezpieczeństwa fotobiologicznego zamienników żarówek”, *Elektroinstalator*, nr 7-8, pp. 54-61, 2012.
- [246] Martinsons C. i Zissis G., Solid State Lighting Annex: Potential Health Issues of SSL, Final Report, Energy Efficient End-Use Equipment (4E), International Energy Agency, 2014.
- [247] Gunay H. B., O'Brien W. i Beausoleil-Morrison I., „A critical review of observation studies, modeling, and simulation of adaptive occupant behaviors in offices”, *Building and Environment*, tom 70, pp. 31-47, 2013.
- [248] Meerbeek B. W., de Bakker C., de Kort Y. A. W., van Loenen E. J. i Bergman T., „Automated blinds with light feedback to increase occupant satisfaction and energy saving”, *Building and Environment*, tom 103, pp. 70-85, 2016.
- [249] Ahmadi-Karvigh A., Ghahramani A., Becerik-Gerber B. i Soibelman L., „One size does not fit all: Understanding user preferences for building automation systems”, *Energy and Buildings*, tom 145, pp. 163-173, 2017.
- [250] Bellia L., Fragliasso F. i Stefanizzi E., „Why are daylight-linked controls (DLCs) not so spread? A literature review”, *Building and Environment*, tom 106, pp. 301-312, 2016.
- [251] Gentile N., Dubois M. i Laike T., „Daylight harvesting control systems design recommendations based on a literature review”, *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Rome, Italy*, pp. 632-637, 2015.
- [252] Karlsen L., Heiselberg P., Bryn I. i Johra H., „Solar shading control strategy for office buildings in cold climate”, *Energy and Buildings*, tom 118, pp. 316-328, 2016.
- [253] 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*, pp. 745-752, 2009.
- [254] Galasiu A. D., Newsham G. R., Suvagau C. i Sander D. M., „Energy Saving Lighting Control Systems for Open-Plan Offices: A Field Study”, *LEUKOS: The Journal of the Illuminating Engineering Society*, tom 4, nr 1, pp. 7-29, 2007.
- [255] 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, pp. 25-41, 2008.
- [256] Maniccia D., Rutledge B., Rea M. S. i Morrow W., „Occupant Use of Manual Lighting Controls in Private Offices”, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, tom 28, nr 2, pp. 42-56, 1999.

- [257] Vine E., Lee E., Clear R., DiBartolomeo D. i Selkowitz S., „Office worker response to an automated Venetian blind and electric lighting system: a pilot study”, *Energy and Buildings*, tom 28, nr 2, pp. 205-218, 1998.
- [258] CEN/TR 15193-2:2017 Energy performance of buildings. Energy requirements for lighting. Explanation and justification of EN 15193-1, Module M9.
- [259] de Bakker C., Aarts M., Kort H. i Rosemann A., „The feasibility of highly granular lighting control in open-plan offices: Exploring the comfort and energy saving potential”, *Building and Environment*, tom 142, pp. 427-438, 2018.
- [260] Sarwono J., Larasati A. E., Novianto W. N. I., Sihar I. i Utami S. S., „Simulation of Several Open Plan Office Design to Improve Speech Privacy Condition without Additional Acoustic Treatment”, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, tom 184, pp. 315-321, 2015.
- [261] Hongisto V., Haapakangas A., Varjo J., Helenius R. i Koskela H., „Refurbishment of an open-plan office – Environmental and job satisfaction”, *Journal of Environmental Psychology*, tom 45, pp. 176-191, 2016.
- [262] Kuzub J., „Open Space”, <https://zielonalinia.gov.pl/-/open-space-60081>, dostęp: 27 lutego 2019 r.
- [263] My Meeting Rooms Sp. z o. o., „Czym jest Open Space? Wady i zalety otwartej przestrzeni w biurze”, <http://www.mymeetingrooms.pl>, dostęp: 27 lutego 2019 r.
- [264] O'Brien W., Kapsis K. i Athienitis A. K., „Manually-operated window shade patterns in office buildings: A critical review”, *Building and Environment*, tom 60, pp. 319-338, 2013.
- [265] de Bakker C., Aarts M., Kort H., Meier A. i Rosemann A., „Local Lighting Control in Open-Plan Offices: The Influence of Office Lay-Out”, *Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018)*, 2018.
- [266] Urbanowicz B., „Wpływ teorii organizacji pracy na przestrzeń biurową”, *Architecturae et Artibus*, tom 3, nr 4, pp. 52-65, 2011.
- [267] Garg V. i Bansal N. K., „Smart occupancy sensors to reduce energy consumption”, *Energy and Buildings*, tom 32, nr 1, pp. 81-87, 2000.
- [268] de Bakker C., van de Voort T. i Rosemann A., „The Energy Saving Potential of Occupancy-Based Lighting Control Strategies in Open-Plan Offices: The Influence of Occupancy Patterns”, *Energies*, tom 11, nr 2, 2018.
- [269] Chang W. i Hong T., „Statistical Analysis and Modeling of Occupancy Patterns in Open-Plan Offices using Measured Lighting-Switch Data”, *Journal of Building Simulation*, 2013.
- [270] de Korte E. M., Spiekman M., van Oeffelen L. H., van der Zande B., Vissenberg G., Huiskes G. I Kuijt-Evers L. F. M., „Personal environmental control: Effects of pre-set conditions for heating and lighting on personal settings, task performance and comfort experience”, *Building and Environment*, tom 86, pp. 166-176, 2015.
- [271] Zhou X., Yan D., Hong T. i Ren X., „Data analysis and stochastic modeling of lighting energy use in large office buildings in China”, *Energy and Buildings*, tom 86, pp. 275-287, 2015.
- [272] D'Oca S. i Hong T., „Occupancy schedules learning process through a data mining framework”, *Energy and Buildings*, tom 88, pp. 395-408, 2015.
- [273] Kamińska A. i Radajewski R., „Instalacja do badania algorytmów sterowania oświetleniem”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 10, pp. 286-288, 2010.
- [274] Pellegrino A., Lo Verso V. R. M., Blaso L., Acquaviva A., Patti E. i Osello A., „Lighting Control and Monitoring for Energy Efficiency: A Case Study Focused on the Interoperability of Building Management Systems”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, tom 52, nr 3, pp. 2627-2637, 2016.
- [275] Siemens Switzerland Ltd, Building Automation – Impact on energy efficiency: Application of EN 15232-1:2017.
- [276] de Bakker C., van de Voort T., van Duijnhoven J. i Rosemann A., „Assessing the energy use of occupancy-based lighting control strategies in open-plan offices”, *IEEE 14th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC), 16-18 May 2017, Calabria, Italy*, 2017.
- [277] de Bakker C., Aries M. B. C., Kort H. S. M. i Rosemann A. L. P., „Localized lighting in open-plan offices”, *LICHT, 25-29 September 2016, Karlsruhe, Germany*, pp. 101-106, 2016.
- [278] Moore T., Carter D. i Slater A., „User attitudes toward occupant controlled office lighting”, *Lighting Research & Technology*, tom 34, nr 3, pp. 207-216, 2002.
- [279] Pandharipande A. i Caicedo D., „Adaptive Illumination Rendering in LED Lighting Systems”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, tom 43, nr 5, pp. 1052-1062, 2013.

- [280] Zhang D. i Xia X., „Distributed illumination control of LED networked systems via local occupancy information”, *2017 IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control (CDC), Melbourne, VIC, Australia*, pp. 4141-4146, 2017.
- [281] Jennings J. D., Rubinstein F. M., DiBartolomeo D. i Blanc S. L., „Comparison of control options in private offices in an advanced lighting controls testbed”, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, tom 29, nr 2, pp. 39–60, 2000.
- [282] Reinhart C. F., „Lightswitch-2002: a model for manual and automated control of electric lighting and blinds”, *Solar Energy*, tom 77, nr 1, pp. 15-28, 2004.
- [283] Boyce P. R., „Observations of the manual switching of lighting”, *Lighting Research & Technology*, tom 12, nr 4, pp. 195-205, 1980.
- [284] 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, pp. 161-180, 2012.
- [285] Tran D. i Tan Y. K., „Sensorless Illumination Control of a Networked LED-Lighting System Using Feedforward Neural Network”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, tom 61, nr 4, pp. 2113-2121, 2014.
- [286] 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, pp. 131-142, 2000.
- [287] Pawlak A., „Bezpieczeństwo fotobiologiczne zamienników żarówek”, *Prace Instytutu Elektrotechniki*, tom 269, pp. 67-81, 2015.
- [288] Soori P. K. i Vishwas M., „Lighting control strategy for energy efficient office lighting system design”, *Energy and Buildings*, tom 66, pp. 329-337, 2013.
- [289] Rubinstein F. M. i Karayel M., „The Measured Energy Savings from Two Lighting Control Strategies”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Tom IA-20, nr 5, pp. 1189-1197, 1984.
- [290] Floyd D. B., Parker D. S. i Sherwin J. R., „Measured Field Performance and Energy Savings of Occupancy Sensors: Three Case Studies”, *Measured Field Performance and Energy Savings of Occupancy Sensors*, tom 4, pp. 99-105, 1996.
- [291] Dikel E. E. i Newsham G. R., „Unlocking the potential energy savings from shorter time delay occupancy sensors”, *LD+A Magazine*, tom 44, nr 12, pp. 54-56, 2014.
- [292] Labeodan T., de Bakker C., Rosemann A. i Zeiler W., „On the application of wireless sensors and actuators network in existing buildings for occupancy detection and occupancy-driven lighting control”, *Energy and Buildings*, tom 127, pp. 75-83, 2016.
- [293] PN-EN 15232:2012 Energetyczne właściwości budynków - Wpływ automatyzacji, sterowania i technicznego zarządzania budynkami.
- [294] Weng T. i Agarwal Y., „From Buildings to Smart Buildings—Sensing and Actuation to Improve Energy Efficiency”, *IEEE Design & Test of Computers*, tom 29, nr 4, pp. 36-44, 2012.
- [295] Salimi S. i Hammad A., „Critical review and research roadmap of office building energy management based on occupancy monitoring”, *Energy and Buildings*, tom 182, pp. 214-241, 2019.
- [296] Candanedo L. M. i Feldheim V., „Accurate occupancy detection of an office room from light, temperature, humidity and CO² measurements using statistical learning models”, *Energy and Buildings*, tom 112, pp. 28-39, 2016.
- [297] Labeodan T., Aduda K., Zeiler W. i Hoving F., „Experimental evaluation of the performance of chair sensors in an office space for occupancy detection and occupancy-driven control”, *Energy and Buildings*, tom 111, pp. 195-206, 2016.
- [298] Manzoor F., Linton D. i Loughlin M., „Occupancy Monitoring Using Passive RFID Technology for Efficient Building Lighting Control”, *2012 Fourth International EURASIP Workshop on RFID Technology, Torino, Italy*, pp. 83-88, 2012.
- [299] Richman E. E., Dittmer A. L. i Keller J. M., „Field analysis of occupancy sensor operation: parameters affecting lighting energy savings”, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, tom 25, nr 1, pp. 83-92, 1996.
- [300] Chung T. i Burnett J., „On the prediction of lighting energy savings achieved by occupancy sensors”, *Energy engineering*, tom 98, nr 4, pp. 6–23, 2001.
- [301] Maniccia D., Tweed A., Bierman A. i Von Neida B., „The effects of changing occupancy sensor time-out setting on energy savings, lamp cycling and maintenance costs”, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, tom 30, nr 2, pp. 97-110, 2001.

- [302] Von Neida B., Maniccia D. i Tweed A., „An analysis of the energy and cost savings potential of occupancy sensors for commercial lighting systems”, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, tom 30, pp. 111-125, 2001.
- [303] Rubinstein F. i Enscoe A., „Saving energy with highly-controlled lighting in an open-plan office”, *LEUKOS: The Journal of the Illuminating Engineering Society*, tom 7, nr 1, pp. 21-36, 2010.
- [304] Kamaruzzaman S. i Zulkifli N., „A Review of the Lighting Performance in Buildings through Energy Efficiency”, *2nd International Conference on Research in Science, Engineering and Technology (ICRSET'2014)*, 2014.
- [305] Roisin B., Bodart M., Deneyer A. i D'Herdt P., „Lighting energy savings in offices using different control systems and their real consumption”, *Energy and Buildings*, tom 40, nr 4, pp. 514-523, 2008.
- [306] Wang Y. i Dasgupta P., „Designing an adaptive lighting control system for smart buildings and homes”, *2015 IEEE 12th International Conference on Networking, Sensing and Control, Taipei, Taiwan*, pp. 450-455, 2015.
- [307] Onaygil S. i Guler O., „Determination of the energy saving by daylight responsive lighting control system with an example from Istanbul”, *Building and Environment*, tom 38, pp. 973-977, 2003.
- [308] Doulos L., Tsangrassoulis A. i Topalis F., „Quantifying energy savings in daylight responsive systems: the role of dimming electronic ballasts”, *Energy and Buildings*, tom 40, pp. 36-50, 2008.
- [309] Kumar R., „New algorithms for daylight harvesting in a private office”, *18th International Conference on Information Fusion (Fusion), 17 IX 2015, Washington, DC, USA*, 2015.
- [310] Hackel S. i Schuetter S., Commissioning for Optimal Savings from Daylight Control, Energy Center of Wisconsin, Minnesota Department of Commerce, Division of Energy Resources, 2013.
- [311] Acosta I., Munoz C., Campano M. A. i Navarro J., „Analysis of daylight factors and energy saving allowed by windows under overcast sky conditions”, *Renewable Energy*, tom 77, pp. 194-207, 2015.
- [312] Ferreira C., Soares C.P. i Rocha P., „Research on energy saving potential of daylighting in tropical climates: a case study of the building Ibope, Brazil”, *Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, 14-16 XI 2011, Sydney*, pp. 1920-1925, 2011.
- [313] Chung T. M., Burnett J. i Martin K. T. W., „Office lighting retrofit using dimmable electronic ballasts and occupancy controls”, *HKIE Transactions*, tom 8, nr 3, pp. 8-15, 2001.
- [314] Lee E. S. i Selkowitz S. E., „The New York times headquarters daylighting mockup: monitored performance”, *Energy and Buildings*, tom 38, pp. 914-929, 2006.
- [315] Galasiu A. D., Atif M. R. i MacDonald R. A., „Impact of window blinds on daylight-linked dimming and automatic on/off lighting controls”, *Solar Energy*, tom 76, nr 5, pp. 523-544, 2004.
- [316] Athienitis A. K. i Tzempelikos A., „A methodology for simulation of daylight room illuminance distribution and light dimming for a room with a controlled shading device”, *Solar Energy*, tom 72, nr 4, pp. 271-281, 2002.
- [317] Kim I. T., Kim Y. S., Nam H. i Hwang T., „Advanced Dimming Control Algorithm for Sustainable Buildings by Daylight Responsive Dimming System”, *Sustainability*, tom 10, nr 11, pp. 1-15, 2018.
- [318] Ihm P., Nemri A. i Krarti M., „Estimation of lighting energy savings from daylighting”, *Building and Environment*, tom 44, nr 3, pp. 509-514, 2009.
- [319] Hu J. i Olbina S., „Illuminance-based slat angle selection model for automated control of split blinds”, *Building and Environment*, tom 46, nr 3, pp. 786-796, 2011.
- [320] Chen Y., Li H. i Chen X., „Venetian Blind Control System Based on Fuzzy Neural Network for Indoor Daylighting”, *IEEE Second International Conference on Computer and Electrical Engineering, 28-30 XII 2009, Dubai, United Arab Emirates*, nr 269-273, 2009.
- [321] Grynning S., Time B. i Matusiak B., „Solar shading control strategies in cold climates – Heating, cooling demand and daylight availability in office spaces”, *Solar Energy*, tom 107, pp. 182-194, 2014.
- [322] Konstantoglou M. i Tsangrassoulis A., „Dynamic operation of daylighting and shading systems: A literature review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, tom 60, pp. 268-283, 2016.
- [323] Xiong J. i Tzempelikos A., „Model-based shading and lighting controls considering visual comfort and energy use”, *Solar Energy*, tom 134, pp. 416-428, 2016.
- [324] Lee E. S., DiBartolomeo D. L. i Selkowitz S. E., „Thermal and daylighting performance of an automated venetian blind and lighting system in a full-scale private office”, *Energy and Buildings*, tom 29, nr 1, pp. 47-63, 1998.

- [325] Kamińska A. i Radajewski R., „Obiekt i układy do badania wpływu sterowania instalacją grzewczą na zużycie energii”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 11a, pp. 345-348, 2010.
- [326] Van Den Wymelenberg K., „Patterns of occupant interaction with window blinds: A literature review”, *Energy and Buildings*, tom 51, pp. 165-176, 2012.
- [327] Fernandes L. L., Lee E. S., DiBartolomeo D. L. i McNeil A., „Monitored lighting energy savings from dimmable lighting controls in The New York Times Headquarters Building”, *Energy and Buildings*, Tom 68, część A, pp. 498-514, 2014.
- [328] Higuera J., Hertog W., Peralvarez M., Polo J. i Carreras J., „Smart lighting system ISO/IEC/IEEE 21451 compatible”, *IEEE Sensors Journal*, tom 15, nr 5, pp. 2595–2602, 2015.
- [329] Tan Y. K., Huynh T. P. i Wang Z., „Smart personal sensor network control for energy saving in DC grid powered LED lighting system”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, tom 4, nr 2, pp. 669–676, 2013.
- [330] Rubinstein F., Siminovitch M. i Verderber R., „Fifty percent energy savings with automatic lighting controls”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, tom 29, nr 4, pp. 768–773, 1993.
- [331] Wen Y. J. i Agogino A. M., „Wireless networked lighting systems for optimizing energy savings and user satisfaction”, *IEEE Wireless Hive Networks Conference, 7-8 Aug. 2008, Austin, TX, USA*, 2008.
- [332] Wen Y. J. i Agogino A., „Control of wireless-networked lighting in open-plan offices”, *Lighting Research & Technology*, tom 43, nr 2, pp. 235–248, 2011.
- [333] Kräuchi P., Dahinden C., Jurt D., Wouters V., Menti U. P. i Steiger O., „Electricity consumption of building automation”, *Energy Procedia*, tom 122, pp. 295-300, 2017.
- [334] Chen Y., Liu J., Pei J., Cao X., Chen Q. i Jiang Y., „Experimental and simulation study on the performance of daylighting in an industrial building and its energy saving potential”, *Energy and Buildings*, tom 73, pp. 184-191, 2014.
- [335] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy.
- [336] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 1 grudnia 1998 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy na stanowiskach wyposażonych w monitory ekranowe.
- [337] PN-EN 12665:2011 Światło i oświetlenie - Podstawowe terminy oraz kryteria określania wymagań dotyczących oświetlenia.
- [338] Wolska A., „Problemy badania oświetlenia na stanowiskach pracy związane z wprowadzeniem nowej normy”, *Bezpieczeństwo Pracy: nauka i praktyka*, tom 11, pp. 11-13, 2005.
- [339] 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, pp. 358–376, 2006.
- [340] Tanaka S., Yoshikata M., Miki M. i Hiroyasu T., „An evolutionary optimization algorithm to provide individual illuminance in workplaces”, *2009 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, San Antonio*, pp. 941-947, 2009.
- [341] Kruijselbrink T., Dangol R. i Rosemann A., „Photometric measurements of lighting quality: An overview”, *Building and Environment*, tom 138, pp. 42-52, 2018.
- [342] Darula S. i Pracki P., „Oświetlenie dzienne i sztuczne w projektowaniu zdrowego i energooszczędnego środowiska w budynkach”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 11, pp. 237-241, 2009.
- [343] Smolders K. C. H. J. i de Kort Y. A. W., „Bright light and mental fatigue: Effects on alertness, vitality, performance and physiological arousal”, *Journal of Environmental Psychology*, tom 39, pp. 77-91, 2014.
- [344] Smolders K. C. H. J., de Kort Y. A. W. i Cluitmans P. J. M., „A higher illuminance induces alertness even during office hours: Findings on subjective measures, task performance and heart rate measures”, *Physiology & Behavior*, tom 107, nr 1, pp. 7-16, 2012.
- [345] van Duijnhoven J., de Bakker C., Aarts M. P. J., Rosemann A. L. P. i Kort H. S. M., „An unobtrusive practical method to derive individual's lighting conditions in office environments”, *Proceedings of the 2017 IEEE 14th International Conference on Networking, Sensing and Control, ICNSC 2017, 16-18 May 2017, Calabria, Italy*, pp. 471-475, 2017.
- [346] Veitch J. A. i Newsham G. R., „Preferred luminous conditions in open-plan offices: Research and practice recommendations”, *Lighting Research & Technology*, tom 32, pp. 199-212, 2000.
- [347] Uttley J., Fotios S. i Cheal C., „Satisfaction and illuminances set with user-controlled lighting”, *Architectural Science Review*, tom 56, nr 4, pp. 306-314, 2013.

- [348] 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, pp. 24-35, 2017.
- [349] Fotios S. i Cheal C., „Stimulus range bias explains the outcome of preferred-illuminance adjustments”, *Lighting Research & Technology*, tom 42, nr 4, pp. 433-447, 2010.
- [350] Boyce P. R., Veitch J. A., Newsham G. R., Myer M. i Hunter C. M., *Lighting Quality and Office Work: A Field Simulation Study, A Report for the Light Right Consortium*, 2003.
- [351] 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*, pp. 19-41, 2004.
- [352] 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, pp. 7-26, 2005.
- [353] 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*, pp. 175-180, 1998.
- [354] Newsham G. R. i Mancini S., „The Potential for Demand-Responsive Lighting in Non-daylit Offices”, *LEUKOS: The Journal of the Illuminating Engineering Society*, tom 3, nr 2, pp. 105-120, 2006.
- [355] Basu C., Caubel J. J., Kim K., Cheng E., Dhinakaran A., Agogino A. M. i Martin R. A., „Sensor-Based Predictive Modeling for Smart Lighting in Grid-Integrated Buildings”, *IEEE Sensors Journal*, tom 14, nr 12, pp. 4216-4229, 2014.
- [356] Granderson J. i Agogino A., „Intelligent Office Lighting: Demand-Responsive Conditioning and Increased User Satisfaction”, *LEUKOS: The Journal of the Illuminating Engineering Society*, tom 2, nr 3, pp. 185-198, 2006.
- [357] Dokumentacja powykonawcza: Budowa budynku Małopolskiego Laboratorium Budownictwa Energooszczędnego Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki w Krakowie wraz z urządzeniami budowlanymi i infrastrukturą techniczną, architektura: Furtak M., konstrukcja: Szydłowski R., instalacje sanitarne: Wójcik K., instalacje elektryczne i automatyka: Spaczyński M., 2014.
- [358] EVERFINE Corporation, SFIM-300 spectral flickering irradiance meter user manual V2.00.
- [359] Kowalska J., „Określanie jakości oddawania barw źródeł światła parametrami przedstawionymi w zaleceniach IES TM-30-15 i CIE 013.3-1995”, *Przegląd Elektrotechniczny*, tom 93, nr 6, pp. 50-54, 2017.
- [360] Gryko Ł., Błaszczak U., Zając A. i Palkowska A., „Ocena możliwości modelowania temperatury barwowej najbliższej zestawu diod LED dużej mocy”, *Przegląd Elektrotechniczny*, tom 92, nr 9, pp. 157-162, 2016.
- [361] Kowalska J., „Niejednoznaczności i ograniczenia w określaniu jakości oddawania barw źródeł światła wskaźnikiem Ra (CIE CRI)”, *Przegląd Elektrotechniczny*, tom 93, nr 5, pp. 74-78, 2017.
- [362] „ANSI C78.377-2011 American National Standard for Electric Lamps - Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting (SSL) Products”, 2011.
- [363] Sivaji A., Shopian S., Nor Z. M., Chuan N. K. i Bahri S., „Lighting does Matter: Preliminary Assessment on Office Workers”, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, tom 97, pp. 638-647, 2013.
- [364] Janosik E., Marzec S., Łaciak M., Nowicka J. i Zachara J., „Porównawcza ocena wpływu światła żarówek i świetlówek kompaktowych na sprawność i komfort widzenia osób z różnych grup wiekowych”, *Przegląd Elektrotechniczny*, tom 88, nr 5a, pp. 177-180, 2018.
- [365] Pawlak A., „Wyniki badań zmęczenia wzroku osób o umiarkowanym upośledzeniu widzenia w zależności od systemu oświetleniowego”, *Przegląd Elektrotechniczny*, tom 88, nr 3a, pp. 88-91, 2018.
- [366] PN-EN 50160:2010 - Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych.
- [367] Aries M. B. C., Veitch J. A. i Newsham G. R., „Physical and psychological discomfort in the office environment”, *Light and Health Research Foundation (SOLG) Conference, Eindhoven, the Netherlands, November 8, 2007.*, 2007.
- [368] Godithi S. B., Sachdeva E., Garg V., Brown R., Kohler C. i Rawal R., „A review of advances for thermal and visual comfort controls in personal environmental control (PEC) systems”, *Intelligent Buildings International*, tom 11, nr 2, pp. 75-104, 2019.

- [369] Veselý M., Kramer R. i Zeiler W., „Energy performance of personalized heating: Numerical case study for a medium sized office building including different envelope qualities and climates”, *Journal of Building Engineering*, tom 21, pp. 113-119, 2019.
- [370] Moore T., Carter D. i Slater A., „A field study of occupant controlled lighting in offices”, *Lighting Research & Technology*, tom 34, nr 3, pp. 191–202, 2002.
- [371] de Bakker C., Aarts M., Kort H. i Rosemann A., „Local lighting control in open-plan offices: Acceptable or distracting?”, *Healthy Buildings 2017 Europe, July 2-5, 2017, Lublin*, pp. 1-2, 2017.
- [372] Creemers P. T. J., Loenen van E. J., Aarts M. P. J., Chraibi S. i Lashina T., „Acceptable fading time of a granular controlled lighting system for co-workers in an open office”, *Proceedings of Experiencing Light 2014: International Conference on the Effects of Light on Wellbeing, 10-11 November 2014*, pp. 70-73, 2014.
- [373] DIAL GmbH, „Lighting design software DIALux”, <https://www.dial.de/en/dialux/>, dostęp: 14 stycznia 2017 r.
- [374] Pawlak A., „Measurement verification of computer simulations for the escape route lighting installation”, *Proceedings of the Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen), Karpacz, 2016*.
- [375] Shikder S. H., Price A. D. F. i Mourshed M., „Evaluation of four artificial lighting simulation tools with virtual building reference”, *Proceedings of European Simulation and Modelling Conference (ESM 2009), Leicester, United Kingdom*, pp. 77-82, 2009.
- [376] Meshkova T. V. i Budak V. P., „Dialux 4.10 and Dialux Evo - main differences”, *Light & Engineering*, tom 21, nr 4, pp. 58-63, 2013.
- [377] Żagan W. i Wasserfurth N., „Wizualizacja komputerowa oświetlenia - nowa jakość w projektowaniu”, *Przegląd Elektrotechniczny*, tom 85, nr 9, pp. 388-394, 2009.
- [378] Mardaljevic J., „Verification of program accuracy for illuminance modelling: assumptions, methodology and an examination of conflicting findings”, *Lighting Research & Technology*, tom 36, nr 3, pp. 217-239, 2004.
- [379] Caicedo D. i Pandharipande A., „Daylight and occupancy adaptive lighting control system: An iterative optimization approach”, *Lighting Research & Technology*, tom 48, nr 6, pp. 661–675, 2016.
- [380] The MathWorks Inc., <https://www.mathworks.com/>, dostęp: 17 listopada 2018 r.
- [381] Dudzik M., Współczesne metody projektowania, weryfikacji poprawności i modelowania zjawisk trakcji elektrycznej, Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2018.
- [382] StatSoft, „Internetowy Podręcznik Statystyki. Sieci neuronowe.”, <http://www.statsoft.pl/>, dostęp: 24 stycznia 2019 r.
- [383] Demuth H., Beale M. i Hagan M., *Neural Network Toolbox 7 User's Guide*, The MathWorks, Inc., 2010.
- [384] Tadeusiewicz R., Gąciarz T., Borowik B. i Leper B., *Odkrywanie własności sieci neuronowych przy użyciu programów w języku C#*, Kraków: Wydawnictwo PAU, 2007.
- [385] D. M., „Towards Characterization of Indoor Environment in Smart Buildings: Modelling PMV Index Using Neural Network with One Hidden Layer”, *Sustainability*, tom 12(17), 2020.
- [386] 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.
- [387] 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.
- [388] Resnick R., Walker J. i Halliday D., *Podstawy fizyki Tom 4*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2003.
- [389] Illuminating Engineering Society (IES), „ANSI/IES RP-16-17, Nomenclature and Definitions for Illuminating Engineering”, <https://www.ies.org/standards/definitions/>, dostęp: 16 kwietnia 2019 r.
- [390] The International Commission on Illumination (CIE), *CIE 13.3-1995 Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources (E)*, 1995.
- [391] Janosik E., Marzec S. i Łaciak M., „Warunki oświetleniowe w mieszkaniach – wyniki badań ankietowych”, *Przegląd Elektrotechniczny*, tom 86, nr 10, pp. 206-211, 2010.

8. Spis tabel i ilustracji

Spis tabel

| | |
|--|-----|
| Tabela 1. Przegląd podstawowych parametrów źródeł światła [27, 25, 31, 200, 201, 202, 203]. | 33 |
| Tabela 2. Obszary funkcjonalne systemów i instalacji technicznych budynku typu smart oraz podsystemy działające w ramach tych obszarów odpowiedzialne za realizację poszczególnych funkcji [56]. | 42 |
| Tabela 3. Oszczędności energii na oświetlenie w biurach uzyskiwane dzięki regulacji instytucjonalnej. . | 58 |
| Tabela 4. Oszczędności energii na oświetlenie w biurach uzyskiwane dzięki regulacji indywidualnej. | 59 |
| Tabela 5. Zestawienie metod znajdujących zastosowanie w wykrywaniu zajętości pomieszczenia lub jego stref na potrzeby sterowania oświetleniem [148, 168, 145, 290, 48, 176, 297, 295, 298, 28]. ... | 63 |
| Tabela 6. Oszczędności energii na oświetlenie w biurach, uzyskiwane dzięki systemom automatycznego sterowania z wykrywaniem zajętości pomieszczenia. | 64 |
| Tabela 7. Oszczędności energii na oświetlenie w biurach, uzyskiwane dzięki systemom automatycznego sterowania z uwzględnieniem czynnika światła dziennego. | 69 |
| Tabela 8. Oszczędności energii na oświetlenie w biurach, uzyskane z wykorzystaniem kombinacji różnych metod automatycznego sterowania w jednym systemie. | 73 |
| Tabela 9. Wymagania w zakresie eksploatacyjnego natężenia oświetlenia oraz równomierności oświetlenia dla biur w zależności od typu obszaru, zadania lub działalności [7]. | 82 |
| Tabela 10. Wymagania dla biur w zakresie rozkładu luminancji i oświetlenia w przestrzeni wnętrza [7]. | 84 |
| Tabela 11. Wymagania w zakresie ujednoczonego wskaźnika ośnienia oraz oddawania barw dla biur w zależności od typu obszaru, zadania lub działalności [7]. | 84 |
| Tabela 12. Indywidualne preferencje ludzi w zakresie natężenia oświetlenia na stanowisku pracy biurowej. | 86 |
| Tabela 13. Parametry charakteryzujące migotanie źródeł światła przy wybranych nastawach. | 92 |
| Tabela 14. Charakterystyka materiałów wykorzystywanych w pomieszczeniu badanym oraz współczynników odbicia lub przepuszczania światła przyjętych w modelu komputerowym [357, 373] | 113 |
| Tabela 15. Specyfikacja sprzętowa komputera PC używanego do obliczeń symulacyjnych. | 114 |
| Tabela 16. Parametry obliczeń przyjęte w programie DIALux 4.13. | 114 |
| Tabela 17. Parametry przyjęte dla procesu uczenia sieci neuronowej | 127 |
| Tabela 18. Wartości współczynnika determinacji R^2 dla danych przypisanych do poszczególnych etapów procesu uczenia sieci, a także dla wszystkich danych uczących. | 131 |
| Tabela 19. Wynikowe oszczędności energii, uzyskiwane dzięki spersonalizowanemu sterowaniu oświetleniem ogólnym biura typu open space z wykorzystaniem: regulacji indywidualnej oraz przy jej współdziałaniu ze sterowaniem od zajętości stanowisk. | 142 |

Spis ilustracji

| | |
|---|----|
| Rysunek 1. Proces rozwoju instalacji elektrycznych: od instalacji tradycyjnych do nowoczesnych instalacji typu smart. | 20 |
| Rysunek 2. Zużycie energii w Unii Europejskiej. | 29 |
| Rysunek 3. Schemat dwustopniowego układu zasilającego źródło światła LED [208]. | 36 |
| Rysunek 4. Przykładowe charakterystyki ściemniania lamp LED czterech różnych producentów: a) względny wytwarzany strumień świetlny w funkcji sygnału sterującego, b) względna moc w funkcji sygnału sterującego, c) względna moc w funkcji względnego wytwarzanego strumienia świetlnego, d) współczynnik mocy w funkcji sygnału sterującego [219]. | 37 |
| Rysunek 5. Struktura hierarchiczna zintegrowanego systemu sterowania i automatyzacji budynku. | 41 |

| | |
|---|----|
| Rysunek 6. Przykładowe, zorientowane na użytkownika interfejsy komunikacji, które umożliwiają przesyłanie do systemu sterowania informacji o odczuciach i preferencjach dotyczących warunków mikroklimatycznych we wnętrzu [58, 80]. | 47 |
| Rysunek 7. Różne modele biura wielkopowierzchniowego: całkowicie otwarta przestrzeń biura typu open space (po lewej) oraz boksy biurowe wyposażone w przegrody rozdzielające stanowiska (po prawej) [47]. | 50 |
| Rysunek 8. Schematy obecności pracowników przy stanowiskach pracy: a) stale obecny, b) obecny poza jedną regularną przerwą, c) obecny poza dwiema regularnymi przerwami, d) obecny w sposób nieregularny, e) obecny sporadycznie w sposób nieregularny; Pzs – prawdopodobieństwo zajęcia stanowiska [269]. | 51 |
| Rysunek 9. Elementy systemu sterowania oświetleniem [86]. | 53 |
| Rysunek 10. Schemat algorytmu sterowania oświetleniem w zależności od światła dziennego w układzie otwartym. | 68 |
| Rysunek 11. Schemat algorytmu sterowania oświetleniem w zależności od światła dziennego w układzie zamkniętym. | 68 |
| Rysunek 12. Schemat algorytmu zintegrowanego sterowania oświetleniem i ruchomymi przesłonami zaciemniającymi w zależności od światła dziennego. Sterownik wykorzystuje także informacje o zajętości pomieszczenia oraz z systemu HVAC. | 72 |
| Rysunek 13. Przykładowy dobowy profil poboru energii przez instalację oświetleniową w biurze, po przeprowadzonej regulacji instytucjonalnej oraz zastosowaniu automatycznego sterowania oświetleniem w zależności od zajętości (wykrywanie oraz harmonogram czasowy) z uwzględnieniem czynnika światła dziennego, w odniesieniu do wyjściowego poboru energii – przypadku konwencjonalnej instalacji oświetleniowej pracującej przez całą dobę z mocą zainstalowaną. Rysunek na podstawie [327]. | 73 |
| Rysunek 14. Średnie oszczędności energii na oświetlenie w biurach – porównanie metod sterowania: ZH – zajętość, harmonogram czasowy, ZW – zajętość, wykrywanie, D – uwzględnienie czynnika światła dziennego, K – kombinacja różnych metod, R – regulacja instytucjonalna, I – regulacja indywidualna; metoda badania: s – symulacja komputerowa, e – eksperyment; n – liczba przypadków. | 78 |
| Rysunek 15. Charakterystyczne obszary przestrzeni podczas wykonywania zadania wzrokowego: 1 – obszar zadania, 2 – obszar bezpośredniego otoczenia (pas o szerokości co najmniej 0,5 m otaczający obszar zadania, w obrębie pola widzenia), 3 – obszar tła (co najmniej 3 m szerokości, przylegający do obszaru bezpośredniego otoczenia, w obrębie granic przestrzeni). | 82 |
| Rysunek 16. 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 [7] (pozioma linia na wykresie). | 87 |
| Rysunek 17. Pomieszczenie doświadczalne 4.02 w budynku Małopolskiego Laboratorium Budownictwa Energooszczędne; w tle widoczne okna (od podłogi do sufitu) zasłonięte zewnętrznymi żaluzjami. | 88 |
| Rysunek 18. Plan pomieszczenia doświadczalnego 4.02 wraz z rozmieszczeniem opraw oświetleniowych. Na rysunku widoczne jest także rozmieszczenie punktów pomiarowych natężenia oświetlenia według przyjętej siatki oświetleniowej. Rysunek na podstawie [357]. | 88 |
| Rysunek 19. Sterownik Loytec L-DALI-3E101 wraz z zasilaczem magistrali DALI zamontowane w pomieszczeniu doświadczalnym. | 89 |
| Rysunek 20. Krzywe światłości zastosowanej oprawy KTM 2 600 firmy ES-SYSTEM | 89 |
| Rysunek 21. Obrazy termograficzne pracujących opraw oprawy KTM 2 600 firmy ES-SYSTEM, widok z dołu (po lewej), widok z boku (po prawej). Na zdjęciu po lewej widoczny jest obszar podwyższonej temperatury, który wynika ze strat występujących w zasilaczu. | 90 |
| Rysunek 22. Rozkład widmowy mocy promienistej źródeł światła w pomieszczeniu doświadczalnym dla 3 nastaw lamp: maksymalnej (100%) – przebieg barwny, 32% – linia biała, minimalnej (10%) – linia szara. Nastawy te korespondują z natężeniami oświetlenia odpowiednio 1500 lx, 500 lx oraz 175 lx osiąganymi na obszarze zadania w centralnej części pomieszczenia. | 91 |

| | |
|---|-----|
| Rysunek 23. Wartości szczegółowych wskaźników oddawania barw R_a lamp w pomieszczeniu doświadczalnym przy nastawie lamp 32% ($\bar{E} \approx 500$ lx) | 91 |
| Rysunek 24. Współrzędne chromatyczne źródeł światła (czarny okrąg) w przestrzeni barw CIE1931, względem krzywej promieniowania ciała doskonale czarnego (czarna linia)..... | 92 |
| Rysunek 25. Przebieg zmienności chwilowego natężenia oświetlenia przy nastawie lamp 32% ($E \approx 500$ lx na obszarze zadania w centralnej części pomieszczenia)..... | 93 |
| Rysunek 26. Plan pomieszczenia doświadczalnego 3.02 – rozmieszczenie stanowisk pracy (pomarańczowe) względem opraw oświetleniowych (żółte). | 94 |
| Rysunek 27. Pomieszczenie doświadczalne 3.02 przygotowane do eksperymentu; w tle widoczne okna (od podłogi do sufitu) zasłonięte zewnętrznymi żaluzjami. | 95 |
| Rysunek 28. Wygląd przykładowego stanowiska pracy biurowej podczas eksperymentu. | 95 |
| Rysunek 29. Procentowy rozkład zadeklarowanych rodzajów wad wzroku u uczestników badania..... | 96 |
| Rysunek 30. Procentowy rozkład metod korekcji wad wzroku podczas badania. | 96 |
| Rysunek 31. Ocena poziomu oświetlenia stanowiska oraz poziomu oświetlenia całego pomieszczenia. | 97 |
| Rysunek 32. Ocena równomierności oświetlenia stanowiska. | 98 |
| Rysunek 33. Procentowy rozkład ocen panujących w pomieszczeniu warunków oświetleniowych (mikroklimatu świetlnego)..... | 98 |
| Rysunek 34. Ocena panujących w pomieszczeniu warunków oświetleniowych w zależności od oceny poziomu oświetlenia całego pomieszczenia. | 98 |
| Rysunek 35. Procentowy rozkład ocen temperatury barwowej oświetlenia pomieszczenia. | 99 |
| Rysunek 36. Ocena chęci do pracy. | 100 |
| Rysunek 37. Ocena chęci do pracy w zależności od oceny poziomu oświetlenia stanowiska..... | 100 |
| Rysunek 38. Ocena oddziaływania oświetlenia na psychikę. | 100 |
| Rysunek 39. Odczuwane objawy zmęczenia oczu. | 101 |
| Rysunek 40. Odsetek osób, które nie zgłaszały objawów zmęczenia oczu w zależności od oceny poziomu oświetlenia stanowiska. | 101 |
| Rysunek 41. Procentowy rozkład ocen występowania migotania oświetlenia oraz w przypadku odpowiedzi „tak” ocena jego uciążliwości. | 101 |
| Rysunek 42. Procentowy rozkład ocen występowania zniekształcenia barw oraz w przypadku odpowiedzi „tak” ocena jego uciążliwości. | 102 |
| Rysunek 43. Procentowy rozkład ocen występowania jaskrawego odbicia słońca w monitorze komputera oraz w przypadku odpowiedzi „tak” ocena jego uciążliwości. | 102 |
| Rysunek 44. Procentowy rozkład ocen występowania jaskrawych odbić lamp w monitorze komputera oraz w przypadku odpowiedzi „tak” ocena ich uciążliwości. | 102 |
| Rysunek 45. Procentowy rozkład ocen występowania jaskrawych odbić światła na elementach pomieszczenia oraz w przypadku odpowiedzi „tak” ocena ich uciążliwości. | 103 |
| Rysunek 46. Mapa oddziaływania systemu indywidualnego sterowania oświetleniem na pracownika. Rysunek na podstawie [345]. | 107 |
| Rysunek 47. 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. | 108 |
| Rysunek 48. Schemat ideowy metody spersonalizowanego sterowania oświetleniem ogólnym w otwartej przestrzeni biurowej..... | 110 |
| Rysunek 49. Plan pomieszczenia doświadczalnego 4.02 – rozmieszczenie stanowisk pracy (pomarańczowe) względem opraw oświetleniowych (żółte). | 112 |
| Rysunek 50. Statyw z bezprzewodowym modułem pomiarowym oraz baza miernika SFIM-300 i komputer wraz z oprogramowaniem pomiarowym podczas prowadzenia pomiaru. | 113 |
| Rysunek 51. Opracowany model komputerowy pomieszczenia badanego: a) widok z góry, b) wizualizacja komputerowa Ray-Trace, widok w kierunku zachodnim. | 115 |
| Rysunek 52. Wykres rozrzutu obrazujący zależność między natężeniami oświetlenia wyznaczonymi symulacyjnie z wykorzystaniem opracowanego modelu (Eobl), a zmierzonym w poszczególnych punktach pomieszczenia (Eemp) wraz z dopasowaną prostą regresji..... | 116 |

| | |
|---|-----|
| Rysunek 53. Rozkład natężenia oświetlenia wyznaczony: a) pomiarowo, b) symulacyjnie, c) pomiarowo – widok z góry, d) symulacyjnie – widok z góry. | 117 |
| Rysunek 54. Powierzchniowy rozkład różnic procentowych pomiędzy natężeniami oświetlenia wyznaczonymi symulacyjnie, a zmierzonymi w pomieszczeniu doświadczalnym: a) widok z góry, b) widok przestrzenny. | 117 |
| Rysunek 55. Koncepcja określania obszaru zadania, bezpośredniego otoczenia oraz tła podczas lokalnego sterowania oświetleniem w otwartej przestrzeni biurowej. | 119 |
| Rysunek 56. System oświetlenia biura w postaci modelu „czarnej skrzynki”. | 120 |
| Rysunek 57. Lokalizacja punktów, w których określano natężenie oświetlenia na stanowisku pracy: w osi środkowej ławki 16 cm od jej przedniej krawędzi oraz po lewej i prawej stronie ławki 30 cm od jej przedniej krawędzi i 20 cm od jej bocznych krawędzi. | 121 |
| Rysunek 58. Zależności występujące w rozważanym systemie oświetleniowym. | 122 |
| Rysunek 59. Struktura sztucznej sieci neuronowej przyjęta do modelowania systemu oświetleniowego; W – blok wag połączeń między neuronami, b – blok stałego współczynnika. | 127 |
| Rysunek 60. Przebiegi wartości funkcji wydajności w dziedzinie epoki uczenia obliczone dla etapów treningu, walidacji oraz testowania sieci. | 129 |
| Rysunek 61. Przebiegi parametrów uczenia sztucznej sieci neuronowej w dziedzinie epoki. | 129 |
| Rysunek 62. Zbiór wykresów regresji liniowej wykonanych dla danych przydzielonych do etapów treningu, walidacji i testów nauczonej sieci neuronowej dla oraz dla wszystkich danych uczących, wraz z wyznaczonymi współczynnikami korelacji liniowej Pearsona (R); <i>l</i> – wynikowe natężenia oświetlenia uzyskiwane na wyjściu sieci dla zadanych nastaw lamp (argumentów wejściowych sieci przydzielonych do procesu uczenia); <i>lucz</i> – referencyjne natężenia oświetlenia (wartości wyjściowe sieci przydzielone do procesu uczenia). | 130 |
| Rysunek 63. Histogram błędów sieci neuronowej. | 131 |
| Rysunek 64. Histogram preferowanych natężeń oświetlenia na biurku. | 136 |
| Rysunek 65. Oznaczenia stanowisk 1 – 17 w pomieszczeniu doświadczalnym wraz z preferencjami oświetleniowymi ich użytkowników. | 136 |
| Rysunek 66. Symulacja pracy tradycyjnej instalacji oświetleniowej wytwarzającej $\bar{E} \approx 500$ lx na obszarze zadania obejmującym całe pomieszczenie: rozkład natężenia oświetlenia, współczynniki ściemnienia lamp oraz średnie natężenia oświetlenia wytwarzane na stanowiskach w odniesieniu do preferowanych wartości. | 137 |
| Rysunek 67. Licznik energii elektrycznej typu Schrack MIZ 32A, zamontowany w tablicy piętrowej, w obwodzie oświetleniowym rozważanego pomieszczenia doświadczalnego. | 138 |
| Rysunek 68. Przykłady optymalnych rozwiązań w postaci: symulacji rozkładów natężenia oświetlenia w pomieszczeniu, współczynników ściemnienia lamp oraz średnich natężeń oświetlenia wytwarzanych na stanowiskach w odniesieniu do preferowanych wartości; wszystkie stanowiska zajęte: a) model liniowy, b) model ANN; 10 z 17 stanowisk zajętych: c) model liniowy, d) model ANN. | 139 |
| Rysunek 69. Przykłady optymalnych rozwiązań w postaci: symulacji rozkładów natężenia oświetlenia w pomieszczeniu, współczynników ściemnienia lamp oraz średnich natężeń oświetlenia wytwarzanych na stanowiskach w odniesieniu do preferowanych wartości; 4 z 17 stanowisk zajętych: a) model liniowy, b) model ANN; 1 z 17 stanowisk zajętych: c) model liniowy, d) model ANN. | 140 |
| Rysunek 70. Średnie wartości bezwzględnych różnic procentowych między wytwarzanym, a preferowanym natężeniem oświetlenia na zajętych stanowiskach. | 141 |
| Rysunek 71. 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. | 142 |

9. Załączniki

Załącznik A

Zestawienie pytań zawartych w kwestionariuszu komputerowym:

Ergonomia pracy na stanowisku komputerowym

ankieta jest anonimowa

***Wymagane**

1. numer stanowiska komputerowego przy którym siedzisz? *

2. Twoja płeć: *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

- kobieta
 mężczyzna

3. Twój wiek: *

4. czy masz zdiagnozowaną wadę wzroku? *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

- tak *Przejdź do pytania 5.*
 nie *Przejdź do pytania 11.*

5. jakiego typu wadę wzroku masz zdiagnozowaną? *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

- krótkowzroczność ("-" ; widzę niewyraźnie w dal) *Przejdź do pytania 6.*
 krótkowzroczność ("-" ; widzę niewyraźnie w dal) z astygmatyzmem *Przejdź do pytania 6.*
 dalekowzroczność ("+" ; widzę niewyraźnie na bliską odległość) *Przejdź do pytania 8.*
 dalekowzroczność ("+" ; widzę niewyraźnie na bliską odległość) z astygmatyzmem *Przejdź do pytania 8.*
 astygmatyzm *Przejdź do pytania 10.*
 nie pamiętam *Przejdź do pytania 10.*

6. Twój stopień krótkowzroczności (w dioptriach):

Zaznacz wszystkie właściwe odpowiedzi.

| | oko lewe | oko prawe |
|----------------|--------------------------|--------------------------|
| do -0,75 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| od -1 do -1,75 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| od -2 do -2,75 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| od -3 do -3,75 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| od -4 do -4,75 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| od -5 do -5,75 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| od -6 do -6,75 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| od -7 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| nie pamiętam | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

7. w tym momencie mam założone: *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

- okulary
- soczewki kontaktowe
- w tej chwili nie korzystam z korekcji
- wogóle nie korzystam z korekcji

Przejdź do pytania 11.

8. Twój stopień dalekowzroczności (w dioptriach):

Zaznacz wszystkie właściwe odpowiedzi.

| | oko lewe | oko prawe |
|----------------|--------------------------|--------------------------|
| do +0,75 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| od +1 do +1,75 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| od +2 do +2,75 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| od +3 do +3,75 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| od +4 do +4,75 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| od +5 do +5,75 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| od +6 do +6,75 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| od +7 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| nie pamiętam | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

9. w tym momencie mam założone: *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

- okulary
- soczewki kontaktowe
- w tej chwili nie korzystam z korekcji
- wogóle nie korzystam z korekcji

Przejdź do pytania 11.

10. w tym momencie mam założone: *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

- okulary
- soczewki kontaktowe
- w tej chwili nie korzystam z korekcji
- wogóle nie korzystam z korekcji

Przejdź do pytania 11.

11. co zmienićbyś/zmieniałabyś na swoim stanowisku? *

(zaznacz wszystkie właściwe odpowiedzi)

Zaznacz wszystkie właściwe odpowiedzi.

- krzesło
- ławkę
- monitor
- oświetlenie
- klawiaturę / myszkę
- stanowisko jest dla mnie optymalne - nie zmieniałbym niczego
- Inne: _____

12. czy rozmiar ekranu monitora na stanowisku jest dla Ciebie optymalny? *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

- tak *Przejdź do pytania 14.*
- nie *Przejdź do pytania 13.*

13. określ jaki powinien być rozmiar ekranu monitora na Twoim stanowisku: *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

- zdecydowanie większy
- większy
- mniejszy
- zdecydowanie mniejszy

14. określ poziom oświetlenia na Twoim stanowisku: *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

- zdecydowanie zbyt jasne *Przejdź do pytania 16.*
- zbyt jasne *Przejdź do pytania 16.*
- optymalne *Przejdź do pytania 16.*
- zbyt ciemne *Przejdź do pytania 15.*
- zdecydowanie zbyt ciemne *Przejdź do pytania 15.*

15. w jaki sposób zwiększyłbyś/zwiększyłabyś jasność oświetlenia Twojego stanowiska? *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

- dodatkowa lampa biurkowa dla jaśniejszego oświetlenia tylko mojego stanowiska
- regulacja oświetlenia lamp przy suficie dla jaśniejszego oświetlenia całego pomieszczenia

16. ogólnie w pomieszczeniu jest: *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

- zdecydowanie zbyt jasno
- zbyt jasno
- optymalnie
- zbyt ciemno
- zdecydowanie zbyt ciemno

17. czy wysokość krzesła, na którym siedzisz jest dla Ciebie optymalna? *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

- tak *Przejdź do pytania 19.*
- nie *Przejdź do pytania 18.*

18. określ jaka powinna być wysokość krzesła: *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

- zdecydowanie wyższe
- wyższe
- niższe
- zdecydowanie niższe

19. określ panujące w pomieszczeniu warunki oświetleniowe: *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

- przyjemne
- dość przyjemne
- neutralne
- irytujące
- nie do zniesienia

20. spójrz na ścianę przed Tobą, czy jej oświetlenie jest: *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

- stanowczo zbyt ciepłe (ściany wydają się mieć żółtą barwę)
- zbyt ciepłe (ściany wydają się mieć delikatnie żółtą barwę)
- optymalne (ściana wydają się białe)
- zbyt zimne (ściany wydają się mieć delikatnie niebieską barwę)
- stanowczo zbyt zimne (ściany wydają się mieć niebieską barwę)

21. czy uważasz, że oświetlenie Twojego stanowiska jest równomierne? *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

| | | | | | | |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| zdecydowanie tak | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | zdecydowanie nie |

22. określ stopień odczuwanej przez Ciebie chęci do pracy: *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

- entuzjizm
- chęć do działania
- obojętność
- znużenie
- niechęć

23. oświetlenie w pomieszczeniu jest: *

(zaznacz wszystkie właściwe odpowiedzi)

Zaznacz wszystkie właściwe odpowiedzi.

- pobudzające
- orzeźwiająca
- uspakajająca
- relaksująca
- usypiająca
- nużąca
- przygnębiająca
- denerwująca

24. czy w tej chwili odczuwasz objawy zmęczenia oczu? *

(zaznacz wszystkie właściwe odpowiedzi)

Zaznacz wszystkie właściwe odpowiedzi.

- bez objawów
- pieczenie oczu
- łzawienie
- ból oczu
- piasek pod powiekami
- rozmazany obraz
- ciężkie powieki
- ból głowy

25. czy chciałbyś/chciałabyś aby żaluzje w oknach były otwarte? *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

- tak *Przejdź do pytania 26.*
- nie *Przejdź do pytania 27.*

26. z jakiego powodu chciałbyś/chciałabyś otworzyć żaluzje? *

(zaznacz wszystkie właściwe odpowiedzi)

Zaznacz wszystkie właściwe odpowiedzi.

- zwiększenie przestrzenności pomieszczenia
- widok na zewnątrz
- więcej światła dziennego w pomieszczeniu
- Inne: _____

27. czy oświetlenie na Twoim stanowisku migocze? *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

- tak *Przejdź do pytania 28.*
 nie *Przejdź do pytania 29.*

28. jak bardzo zaobserwowane migotanie jest dla Ciebie uciążliwe? *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

1 2 3 4 5

w ogóle nieuciążliwe bardzo uciążliwe

29. czy barwy elementów stanowiska oraz skóry (np. rąk) wydają się nienaturalne lub zniekształcone? *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

- tak *Przejdź do pytania 30.*
 nie *Przejdź do pytania 31.*

30. jak bardzo zaobserwowana nienaturalność / zniekształcenie barw jest dla Ciebie uciążliwe? *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

1 2 3 4 5

w ogóle nieuciążliwe bardzo uciążliwe

31. czy występuje jaskrawe odbicie słońca w monitorze komputera na Twoim stanowisku? *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

- tak *Przejdź do pytania 32.*
 nie *Przejdź do pytania 33.*

32. jak bardzo zaobserwowane jaskrawe odbicie słońca w monitorze komputera jest dla Ciebie uciążliwe? *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

1 2 3 4 5

w ogóle nieuciążliwe bardzo uciążliwe

33. czy występują jaskrawe odbicia lamp w monitorze komputera na Twoim stanowisku? *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

- tak *Przejdź do pytania 34.*
 nie *Przejdź do pytania 35.*

34. jak bardzo zaobserwowane jaskrawe odbicia lamp w monitorze komputera są dla Ciebie uciążliwe? *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

1 2 3 4 5

w ogóle nieuciążliwe bardzo uciążliwe

35. czy występują jaskrawe odbicia światła na elementach pomieszczenia? *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

tak *Przejdź do pytania 36.*

nie *Przejdź do pytania 37.*

36. jak bardzo zaobserwowane jaskrawe odbicia światła na elementach pomieszczenia są dla Ciebie uciążliwe? *

Zaznacz tylko jedną odpowiedź.

1 2 3 4 5

w ogóle nieuciążliwe bardzo uciążliwe

Załącznik B

Elementy macierzy **A** wyznaczone metodą symulacji komputerowych:

$$\mathbf{A}_{28 \times 17} = \begin{bmatrix} 89 & 40 & 62 & 32 & 6 & 4 & 6 & 4 & 18 & 13 & 10 \\ 63 & 33 & 88 & 42 & 6 & 4 & 7 & 5 & 48 & 28 & 25 \\ 25 & 17 & 48 & 27 & 5 & 3 & 6 & 4 & 87 & 41 & 62 \\ 10 & 8 & 18 & 13 & 3 & 3 & 5 & 3 & 62 & 33 & 88 \\ 343 & 195 & 180 & 118 & 21 & 12 & 18 & 10 & 29 & 25 & 14 \\ 177 & 116 & 329 & 189 & 18 & 10 & 21 & 12 & 115 & 82 & 41 \\ 42 & 34 & 115 & 82 & 11 & 7 & 16 & 10 & 330 & 190 & 175 \\ 13 & 12 & 29 & 24 & 6 & 5 & 9 & 6 & 177 & 116 & 331 \\ 197 & 339 & 118 & 178 & 89 & 41 & 62 & 32 & 25 & 29 & 12 \\ 118 & 176 & 192 & 331 & 62 & 32 & 87 & 41 & 83 & 115 & 34 \\ 35 & 42 & 83 & 115 & 25 & 17 & 48 & 27 & 192 & 331 & 117 \\ 12 & 13 & 25 & 29 & 10 & 8 & 18 & 13 & 118 & 178 & 194 \\ 42 & 90 & 33 & 63 & 341 & 196 & 179 & 118 & 13 & 19 & 8 \\ 33 & 62 & 41 & 88 & 178 & 117 & 330 & 190 & 27 & 48 & 17 \\ 17 & 24 & 27 & 48 & 42 & 34 & 115 & 82 & 41 & 88 & 33 \\ 8 & 10 & 13 & 19 & 13 & 12 & 29 & 25 & 33 & 63 & 42 \\ 11 & 20 & 10 & 18 & 196 & 340 & 118 & 178 & 6 & 9 & 5 \\ 10 & 18 & 12 & 21 & 118 & 177 & 191 & 330 & 10 & 16 & 7 \\ 7 & 11 & 10 & 16 & 35 & 42 & 82 & 115 & 12 & 21 & 11 \\ 5 & 6 & 7 & 9 & 12 & 14 & 25 & 29 & 11 & 19 & 13 \\ 4 & 7 & 4 & 6 & 42 & 90 & 33 & 63 & 3 & 4 & 3 \\ 4 & 6 & 5 & 7 & 33 & 63 & 41 & 88 & 4 & 6 & 4 \\ 4 & 5 & 5 & 7 & 17 & 25 & 29 & 49 & 5 & 8 & 5 \\ 3 & 4 & 4 & 5 & 9 & 11 & 15 & 21 & 5 & 8 & 6 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 12 & 21 & 11 & 18 & 2 & 2 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 3 & 10 & 16 & 12 & 21 & 2 & 3 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 5 & 8 & 5 & 7 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 2 & 6 & 8 & 6 & 9 & 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

| | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 8 | 4 | 3 | 3 | 3 | 1 |
| 17 | 6 | 4 | 5 | 4 | 1 |
| 33 | 7 | 5 | 7 | 5 | 1 |
| 42 | 7 | 5 | 8 | 5 | 1 |
| 12 | 9 | 7 | 6 | 5 | 2 |
| 34 | 16 | 10 | 11 | 8 | 2 |
| 116 | 22 | 13 | 19 | 11 | 2 |
| 190 | 18 | 11 | 21 | 13 | 1 |
| 13 | 19 | 13 | 10 | 8 | 4 |
| 41 | 48 | 28 | 25 | 17 | 4 |
| 176 | 88 | 42 | 63 | 33 | 3 |
| 334 | 62 | 33 | 89 | 42 | 2 |
| 10 | 29 | 25 | 14 | 12 | 11 |
| 24 | 116 | 83 | 42 | 34 | 10 |
| 62 | 331 | 192 | 178 | 117 | 7 |
| 90 | 176 | 117 | 332 | 193 | 4 |
| 6 | 25 | 29 | 12 | 14 | 38 |
| 11 | 83 | 116 | 35 | 42 | 29 |
| 18 | 191 | 331 | 117 | 178 | 15 |
| 22 | 116 | 176 | 193 | 333 | 7 |
| 3 | 13 | 19 | 8 | 10 | 177 |
| 5 | 28 | 48 | 17 | 25 | 98 |
| 7 | 43 | 90 | 35 | 65 | 30 |
| 9 | 37 | 67 | 46 | 95 | 10 |
| 2 | 7 | 9 | 5 | 6 | 353 |
| 2 | 11 | 19 | 9 | 14 | 82 |
| 1 | 4 | 5 | 3 | 4 | 111 |
| 1 | 5 | 8 | 4 | 5 | 49 |

Załącznik C

Równanie (10) z wartościami zaokrąglonymi do części dziesięciotysięcznych:

$$l = f^{2\} \text{ aktyw.} \left(W_{17 \times 19}^{2\} \left(f^{1\} \text{ aktyw.} \left(W_{19 \times 28}^{1\} \times d + B_{19 \times 1}^{1\} \right) \right) + B_{17 \times 1}^{2\} \right) \quad (17)$$

gdzie:

$$B_{19 \times 1}^{1\} = \begin{bmatrix} 4,2671 \\ 0,0651 \\ 0,0333 \\ 0,0117 \\ 0,0322 \\ 0,0135 \\ 0,0805 \\ 0,0064 \\ 0,0326 \\ -0,0035 \\ -0,0020 \\ -0,0248 \\ -0,0437 \\ -0,0453 \\ 0,0299 \\ 0,0111 \\ -0,0113 \\ 0,0070 \\ 0,0105 \end{bmatrix}, \quad B_{17 \times 1}^{2\} = \begin{bmatrix} -0,0954 \\ 0,0055 \\ 0,0283 \\ -0,0517 \\ 0,1440 \\ 0,1105 \\ -0,2147 \\ 0,1766 \\ 0,3166 \\ -0,0076 \\ 0,2804 \\ 0,0837 \\ -0,2180 \\ 0,1561 \\ 0,1774 \\ 0,1398 \\ -0,2899 \end{bmatrix}$$

$$W_{19 \times 28}^{1\} = \begin{bmatrix} -0,0874 & 0,1144 & 0,1856 & -0,1622 & 0,2042 & -0,5163 & -0,0036 & -0,7592 \\ 0,0071 & -0,0908 & -0,0471 & -0,0240 & 0,0395 & 0,0031 & 0,0080 & 0,0950 \\ -0,0113 & -0,0953 & -0,0576 & -0,0501 & -0,0272 & 0,0372 & 0,0049 & -0,0211 \\ -0,0037 & 0,0084 & -0,0076 & 0,0014 & -0,0292 & 0,0384 & -0,0641 & 0,0094 \\ -0,0024 & -0,0277 & -0,0193 & -0,0172 & 0,0065 & -0,0853 & -0,0017 & -0,0342 \\ -0,0144 & -0,0406 & -0,0180 & -0,0244 & -0,0727 & 0,0915 & 0,0292 & -0,0001 \\ 0,0024 & 0,0250 & 0,0245 & 0,0267 & 0,0091 & 0,0430 & 0,0286 & 0,0610 \\ -0,0108 & 0,0145 & 0,0084 & 0,0306 & -0,0519 & 0,0418 & -0,0414 & 0,1265 \\ 0,0025 & -0,0295 & -0,0244 & -0,0226 & 0,0106 & -0,0011 & -0,0221 & -0,0294 \\ 0,0003 & 0,0052 & -0,0090 & -0,0110 & 0,0044 & 0,0232 & -0,0512 & -0,0417 \\ 0,0120 & 0,0052 & 0,0081 & -0,0022 & 0,0651 & -0,0167 & 0,0388 & -0,0218 \\ 0,0018 & -0,0166 & -0,0108 & -0,0280 & 0,0278 & -0,0430 & 0,0186 & -0,0942 \\ 0,0130 & 0,0040 & -0,0035 & -0,0092 & 0,0523 & -0,0118 & -0,0028 & -0,0336 \\ 0,0000 & -0,0081 & -0,0037 & 0,0037 & 0,0036 & -0,0271 & -0,0115 & 0,0252 \\ 0,0014 & -0,0107 & -0,0035 & -0,0002 & 0,0030 & -0,0431 & -0,0029 & 0,0126 \\ -0,0005 & 0,0056 & -0,0047 & -0,0060 & -0,0044 & 0,0317 & -0,0284 & -0,0179 \\ 0,0040 & -0,0142 & -0,0134 & -0,0263 & 0,0360 & -0,0281 & -0,0010 & -0,0920 \\ 0,0061 & -0,0087 & 0,0000 & -0,0060 & 0,0230 & 0,0015 & 0,0180 & -0,0024 \\ -0,0031 & -0,0158 & -0,0212 & -0,0012 & 0,0084 & -0,0448 & -0,0912 & 0,0176 \end{bmatrix}$$

| | | | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0,0651 | -0,2731 | 0,2561 | 0,3958 | 0,0009 | 0,1919 | -0,1586 | -0,1234 | 0,3444 |
| 0,0236 | -0,0865 | -0,0845 | 0,0238 | -0,0356 | -0,0810 | 0,0417 | 0,0115 | 0,1907 |
| 0,0561 | 0,0487 | -0,0176 | -0,0576 | 0,0057 | -0,0802 | -0,0242 | -0,0039 | -0,1443 |
| -0,0265 | 0,0311 | -0,0057 | 0,0057 | 0,0506 | -0,0226 | 0,0312 | -0,0070 | 0,0550 |
| -0,0344 | -0,0309 | 0,1008 | 0,0329 | -0,0019 | -0,0235 | -0,0047 | -0,0103 | -0,0089 |
| 0,0100 | -0,0544 | -0,1288 | -0,0270 | -0,0979 | -0,0281 | 0,0425 | 0,0345 | 0,0598 |
| 0,0711 | -0,0385 | -0,0658 | -0,0555 | -0,0337 | -0,0458 | -0,0671 | 0,0233 | 0,0096 |
| 0,0200 | -0,0650 | -0,0398 | 0,0842 | -0,0785 | -0,0311 | -0,0013 | 0,0559 | 0,0495 |
| -0,0554 | 0,0991 | 0,0283 | 0,0506 | -0,1232 | 0,0508 | 0,0091 | 0,0370 | -0,0665 |
| 0,0431 | -0,0331 | -0,0609 | -0,0271 | 0,0048 | 0,0143 | -0,0649 | 0,0238 | -0,0319 |
| 0,0804 | 0,0300 | 0,0219 | 0,0146 | 0,0435 | 0,0042 | 0,0460 | -0,0610 | 0,0000 |
| 0,0359 | 0,0472 | 0,0282 | 0,0447 | 0,0158 | -0,0155 | 0,0661 | -0,0044 | 0,1055 |
| 0,0197 | -0,0304 | 0,0339 | 0,0214 | 0,1075 | 0,0157 | 0,0322 | -0,0055 | 0,0539 |
| -0,0113 | 0,0045 | -0,0128 | 0,0068 | 0,0461 | 0,0369 | -0,0484 | -0,0503 | 0,0357 |
| -0,0457 | -0,0524 | -0,0341 | 0,0180 | 0,0206 | 0,0473 | 0,0112 | -0,0041 | -0,0031 |
| 0,0137 | -0,0184 | -0,0218 | -0,0113 | -0,0431 | -0,0463 | -0,0045 | -0,0645 | 0,0125 |
| -0,0041 | 0,0357 | -0,0013 | -0,0219 | -0,1106 | 0,0627 | -0,0618 | 0,0425 | 0,0676 |
| -0,0285 | 0,0134 | -0,0774 | 0,0362 | -0,0217 | -0,0718 | -0,0301 | -0,0307 | 0,0134 |
| 0,0331 | -0,0140 | -0,0207 | -0,0077 | 0,0188 | -0,0392 | 0,0308 | 0,0380 | 0,0148 |
| -0,2322 | 0,8652 | 0,9771 | 0,5920 | -0,6423 | -0,3921 | 0,2136 | -0,2975 | 0,0878 |
| -0,0746 | -0,0431 | -0,0778 | 0,0176 | -0,0199 | -0,0320 | -0,0458 | 0,0062 | -0,0292 |
| 0,1464 | 0,0638 | -0,0439 | -0,0648 | 0,0072 | 0,0092 | -0,0274 | -0,0290 | -0,0292 |
| -0,0365 | 0,0106 | 0,0527 | 0,0128 | -0,0008 | 0,0052 | 0,0166 | 0,0047 | 0,0037 |
| -0,0521 | 0,0387 | -0,0103 | 0,0009 | -0,0053 | 0,0065 | -0,0008 | 0,0177 | 0,0007 |
| 0,0133 | 0,0602 | -0,0579 | 0,0135 | 0,0060 | 0,0017 | -0,0269 | 0,0214 | -0,0100 |
| -0,0037 | -0,0493 | -0,0288 | 0,0269 | 0,0107 | -0,0077 | -0,0101 | 0,0394 | 0,0107 |
| -0,0058 | 0,0371 | 0,0304 | 0,0069 | 0,0012 | 0,0102 | 0,0098 | -0,0250 | -0,0009 |
| -0,0088 | -0,0463 | 0,0268 | 0,0135 | 0,0046 | -0,0088 | -0,0007 | 0,0669 | 0,0051 |
| 0,0271 | 0,0051 | 0,0710 | -0,0138 | 0,0003 | 0,0095 | 0,0188 | -0,0179 | -0,0012 |
| -0,0611 | -0,0006 | -0,0541 | 0,0108 | -0,0059 | -0,0071 | -0,0111 | 0,0312 | 0,0051 |
| -0,0106 | -0,1078 | 0,0243 | 0,0434 | 0,0101 | -0,0223 | -0,0005 | 0,0466 | 0,0059 |
| -0,0131 | -0,0501 | -0,0616 | 0,0158 | -0,0001 | -0,0166 | -0,0186 | 0,0202 | 0,0023 |
| 0,0109 | -0,0441 | -0,0454 | 0,0065 | 0,0001 | -0,0103 | -0,0122 | 0,0033 | -0,0012 |
| 0,0324 | 0,0441 | 0,0416 | -0,0004 | 0,0072 | 0,0139 | 0,0141 | 0,0042 | 0,0023 |
| 0,0298 | 0,0190 | 0,0022 | 0,0075 | 0,0113 | 0,0080 | 0,0051 | -0,0002 | 0,0022 |
| 0,1049 | 0,0769 | -0,0546 | 0,0251 | 0,0306 | 0,0212 | -0,0108 | 0,0019 | 0,0036 |
| 0,0598 | -0,0071 | -0,0657 | -0,0004 | 0,0123 | -0,0031 | -0,0183 | -0,0107 | -0,0046 |
| -0,0250 | -0,0224 | -0,0090 | 0,0023 | -0,0046 | -0,0092 | -0,0067 | 0,0011 | -0,0014 |
| | | | 1,1879 | -0,7270 | | | | |
| | | | 0,0629 | -0,0333 | | | | |
| | | | 0,0521 | -0,0372 | | | | |
| | | | -0,0030 | 0,0036 | | | | |
| | | | 0,0101 | -0,0010 | | | | |
| | | | 0,0451 | -0,0177 | | | | |
| | | | 0,0063 | 0,0082 | | | | |
| | | | -0,0114 | -0,0001 | | | | |
| | | | 0,0335 | 0,0000 | | | | |
| | | | -0,0059 | -0,0017 | | | | |
| | | | 0,0065 | 0,0049 | | | | |
| | | | 0,0170 | 0,0036 | | | | |
| | | | 0,0049 | 0,0031 | | | | |
| | | | 0,0019 | -0,0005 | | | | |
| | | | 0,0047 | -0,0003 | | | | |
| | | | -0,0008 | 0,0005 | | | | |
| | | | 0,0055 | -0,0009 | | | | |
| | | | 0,0039 | -0,0058 | | | | |
| | | | 0,0002 | -0,0001 | | | | |

Załącznik D

Algorytm optymalizacji sterowania z wykorzystaniem modelu liniowego (Matlab R2015A):

```
%LIGHTINGMATRIX - LINEAR MODEL

clear all
clc

%DANE WEJŚCIOWE:
m=28; %liczba zmiennych decyzyjnych zadania optymalizacji
f=ones(1,m); %wektor współczynników funkcji celu
l=[0;550;350;0;0;0;150;0;550;0;450;350;250;350;450;0;650];
%wektor oczekiwanych natężeń oświetlenia na stanowiskach pracy
(10/17 stanowisk zajętych)
lb=0.1*ones(1,m); %ograniczenia dolne zmiennych decyzyjnych
ub=ones(1,m); %ograniczenia górne zmiennych decyzyjnych
A=[(...)67]; %mapa zależności między oddziaływaniem poszczególnych
opraw oświetleniowych, a natężeniami oświetlenia uzyskiwanymi na
poszczególnych stanowiskach
Leq=[];
Eeq=[];

%WYNIKI:
[d, fval, exitflag]=linprog(f,-A,-l,Leq,Eeq,lb,ub)
d=round(d*100) %wektor rozwiązań zadania optymalizacji
zaokrąglonych do najbliższych części setnych
lend=-A*-d/100 %wektor wyników natężeń oświetlenia na
stanowiskach pracy
```

Załącznik E

Algorytm optymalizacji sterowania z wykorzystaniem modelu sieciowego (Matlab R2015A):

```
%LIGHTINGMATRIX - ARTIFICIAL NEURAL NETWORK MODEL

clear all
clc

%DANE WEJŚCIOWE:
m=28; %liczba zmiennych decyzyjnych zadania optymalizacji
fun=@(d)[sum(d)]; %funkcja celu
A=[];
b=[];
Aeq=[];
beq=[];
lb=0.1*ones(1,m); %ograniczenia dolne zmiennych decyzyjnych
ub=ones(1,m); %ograniczenia górne zmiennych decyzyjnych
nonlcon=@unitdisk; %funkcja opisująca ograniczenia nieliniowe
nierównościowe
d0=zeros(1,m); %wektor startowy
```

⁶⁷ elementy jak macierzy $A_{28 \times 17}$ według załącznika B

```

%WYNIKI:
[d,fval,exitflag,output] =
fmincon(fun,d0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon)
d=round(transpose(d*100))/100 %wektor rozwiązań zadania
optymalizacji zaokrąglonych do najbliższych części setnych
lend=transpose(modelANN(transpose(d))) %wektor wyników
natężeń oświetlenia na stanowiskach pracy

```

Funkcja zewnętrzna MATLAB opisująca ograniczenia nieliniowe nierównościowe:

```

function [c,ceq] = unitdisk(d);
l=transpose([150;550;350;550;450;250;150;350;550;450;450;350;250;
;350;450;650;650]); %wektor oczekiwanych natężeń oświetlenia na
stanowiskach pracy (17/17 stanowisk zajętych)
c(1:17)=1-modelANN(d); %odwołanie do modelu ANN opisującego
nieliniową zależność między wektorem d, a wektorem wytwarzanych
natężeń oświetlenia
ceq=[];
end

```

Model ANN w postaci funkcji zewnętrznej MATLAB:

```

function [y1] = myNeuralNetworkFunction(x1)

%MYNEURALNETWORKFUNCTION neural network simulation function.

%Auto-generated by MATLAB, 24-Apr-2020 13:33:29.
%[y1] = myNeuralNetworkFunction(x1) takes these arguments:
x = Qx28 matrix, input #1 and returns: y = Qx17 matrix, output
#1 where Q is the number of samples.

%#ok<*RPMT0>

%==== NEURAL NETWORK CONSTANTS =====

%Input 1 % współczynniki normalizacji danych wejściowych sieci
x1_step1.xoffset =
[0.1;0.1;0.1;0.1;0.1;0.1;0.1;0.1;0.1;0.1;0.1;0.1;0.1;0.1;0.1;
;0.1;0.1;0.1;0.1;0.1;0.1;0.1;0.1;0.1;0.1;0.1;0.1;0.1];
x1_step1.gain =
[2.22222222222222;2.22222222222222;2.22222222222222;2.2222222222
2222;2.22222222222222;2.22222222222222;2.22222222222222;2.222222
22222222;2.22222222222222;2.22222222222222;2.22222222222222;2.22
22222222222222;2.22222222222222;2.22222222222222;2.22222222222222;
2.22222222222222;2.22222222222222;2.22222222222222;2.222222222222
222;2.22222222222222;2.22222222222222;2.22222222222222;2.2222222
22222222;2.22222222222222;2.22222222222222;2.22222222222222;2.222
2222222222;2.22222222222222];
x1_step1.ymin = -1;

%Layer 1 %współczynniki warstwy ukrytej (b1 - wektor stałych
współczynników, IW1_1 - macierz wag argumentów wejściowych
warstwy)
b1 = [4.2671144956598325848; (...)68];
IW1_1 = [-0.087390969739370591429 (...)69];

```

⁶⁸ elementy jak wektora $B_{19 \times 1}^{[1]}$ według załącznika C.

```

%Layer 2 %współczynniki warstwy wyjściowej (b2 - wektor stałych
współczynników, LW2_1 - macierz wag argumentów wejściowych
warstwy)
b2 = [-0.095441169141812040588; (...)70];
LW2_1 = [0.28138502092703027158 (...)71];

%Output 1 %współczynniki denormalizacji danych wyjściowych sieci
y1_step1.ymin = -1;
y1_step1.gain =
[0.00174774249927177;0.00172314761631246;0.00152594099694812;0.0
0149402390438247;0.00167973124300112;0.00169395821569735;0.00146
591741998534;0.00147710487444609;0.00152671755725191;0.001493280
23892484;0.00177147918511957;0.00173210161662818;0.0014669926650
3667;0.00148257968865827;0.00169827342202095;0.00172166427546628
;0.00212089077412513];
y1_step1.xoffset =
[127.333333333333;128.666666666667;145.666666666667;148.66666666
6667;132;131;151.666666666667;150.333333333333;145.333333333333;
148.666666666667;125.333333333333;128.333333333333;151.666666666
667;150;131.333333333333;129;104.666666666667];

%===== SIMULATION =====

%Dimensions
Q = size(x1,1); %samples

%Input 1 %normalizacja danych wejściowych sieci
x1 = x1';
xp1 = mapminmax_apply(x1,x1_step1);

%Layer 1 %warstwa ukryta
a1 = tansig_apply(repmat(b1,1,Q) + IW1_1*xp1);

%Layer 2 %warstwa wyjściowa
a2 = repmat(b2,1,Q) + LW2_1*a1;

%Output 1 %denormalizacja danych wyjściowych sieci, mająca na
celu ich zredukowanie do wartości odpowiadających oryginałom
(sprzed normalizacji)

y1 = mapminmax_reverse(a2,y1_step1);
y1 = y1';
end

%===== MODULE FUNCTIONS =====

%Map Minimum and Maximum Input Processing Function %funkcja
normalizacji min-max
function y = mapminmax_apply(x,settings)
y = bsxfun(@minus,x,settings.xoffset);
y = bsxfun(@times,y,settings.gain);

```

⁶⁹ elementy jak macierzy $\mathbf{W}_{19 \times 28}^{\{1\}}$ według załącznika C.

⁷⁰ elementy jak wektora $\mathbf{B}_{17 \times 1}^{\{2\}}$ według załącznika C.

⁷¹ elementy jak macierzy $\mathbf{W}_{17 \times 19}^{\{2\}}$ według załącznika C.

```

y = bsxfun(@plus,y,settings.ymin);
end

%Sigmoid Symmetric Transfer Function %funkcja aktywacji dla
warstwy ukrytej
function a = tansig_apply(n,~)
a = 2 ./ (1 + exp(-2*n)) - 1;
end

%Map Minimum and Maximum Output Reverse-Processing Function
%funkcja denormalizacji
function x = mapminmax_reverse(y, settings)
x = bsxfun(@minus,y,settings.ymin);
x = bsxfun(@rdivide,x,settings.gain);
x = bsxfun(@plus,x,settings.xoffset);
end

```

*Oświadczam, świadomy odpowiedzialności karnej za poświadczenie nieprawdy,
że niniejszą pracę wykonałem osobiście i samodzielnie oraz, że nie korzystałem
ze źródeł innych niż wymienione w pracy.*