

**POLITECHNIKA POZNAŃSKA**  
**WYDZIAŁ INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ENERGETYKI**  
**INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI**



**ROZPRAWA DOKTORSKA**

*mgr inż. Sławomir Sowa*

**Poprawa efektywności energetycznej instalacji  
oświetleniowych w obiektach użyteczności publicznej**

Promotor:

dr hab. inż. Jarosław Gielniak, prof. PP

Promotor pomocniczy:

dr inż. Grzegorz Dombek

Poznań 2024



### **Podziękowania**

*Składam serdeczne podziękowanie i wyrażam wdzięczność  
żonie Ani, za okazane serce, motywowanie,  
nieocenione wsparcie i wyrozumiałość.*

*Dziękuję serdecznie Promotorowi,  
prof. PP, dr. hab. inż. Jarosławowi Gielniakowi,  
za cierpliwość, okazaną pomoc  
i wszelkie cenne rady podczas pisania pracy.*

*Dziękuję także wszystkim tym, którzy wpierali mnie  
w jakikolwiek sposób podczas wielu lat badań  
i tworzenia tej dysertacji.*



## SPIS TREŚCI

<b>1. WPROWADZENIE .....</b>	<b>11</b>
<b>2. OŚWIETLENIE W ASPEKTCIE EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1. EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA OBIEKTÓW .....</b>	<b>19</b>
2.1.1. Definicja i pojęcia podstawowe .....	19
2.1.2. Klasy energetyczne budynku – kryteria klasyfikacji .....	20
2.1.3. Aspekty prawne .....	29
2.1.4. Czynniki wpływające na efektywność energetyczną obiektów .....	35
2.1.5. Sposoby poprawy efektywności energetycznej obiektów.....	39
<b>2.2. OŚWIETLENIE POMIESZCZEŃ .....</b>	<b>45</b>
2.2.1. Parametry i kryteria definiujące jakość oświetlenia w pomieszczeniach.....	45
2.2.2. Analiza i wybór metod pomiaru natężenia oświetlenia .....	54
2.2.3. Przyrządy pomiarowe parametrów oświetlenia pomieszczeń.....	56
2.2.4. Wykorzystanie światła dziennego do oświetlenia wnętrza.....	57
2.2.5. Sztuczne źródła oświetlenia wnętrza .....	59
2.2.6. Czynniki wpływające na dostępność światła dziennego w pomieszczeniach .....	63
<b>2.3. STEROWANIE OŚWIETLENIEM SZTUCZNYM WE .....</b>	<b>67</b>
<b>WNĘTRZACH .....</b>	<b>67</b>
2.3.1. Sposoby sterowania oświetleniem .....	67
2.3.2. Zastosowanie systemu KNX do inteligentnego sterowania oświetleniem.....	70
<b>3. CEL I TEZA PRACY .....</b>	<b>80</b>
<b>4. KONCEPCJA UKŁADU STEROWANIA OŚWIETLENIEM.....</b>	<b>82</b>
<b>5. BADANIA ROZKŁADU NATĘŻENIA OŚWIETLENIA.....</b>	<b>83</b>
<b>5.1. WYBÓR METODY BADAWCZEJ.....</b>	<b>83</b>
<b>5.2. MIEJSCE PROWADZENIA BADAŃ I IMPLEMENTACJI SYSTEMU STEROWANIA .....</b>	<b>83</b>
<b>OŚWIETLENIEM.....</b>	<b>83</b>
5.2.1. Budynek i jego położenie w kontekście dostępności światła dziennego .....	83
5.2.2. Charakterystyka pomieszczeń z punktu widzenia wykonywanych badań .....	85
5.2.3. Harmonogram pracy w badanym obiekcie .....	88
<b>5.3. BEZPRZEWODOWA MATRYCA FOTOMETRYCZNA .....</b>	<b>90</b>
5.3.1. Budowa i schemat blokowy matrycy pomiarowej .....	90
5.3.2. Czujniki pomiarowe i jednostka centralna .....	93
5.3.3. Oprogramowanie matrycy pomiarowej .....	96
5.3.4. Metodologia pomiarów .....	99
<b>5.4. ROZKŁAD NATĘŻENIA ŚWIATŁA DZIENNEGO W POMIESZCZENIU .....</b>	<b>103</b>
<b>6. IMPLEMENTACJA UKŁADU STEROWANIA OŚWIETLENIEM.....</b>	<b>113</b>
<b>6.1. ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE .....</b>	<b>113</b>
<b>6.2. OPIS UKŁADU STEROWANIA I CHARAKTERYSTYKA URZĄDZEŃ .....</b>	<b>114</b>
<b>6.3. IMPLEMENTACJA ROZKŁADÓW NATĘŻENIA OŚWIETLENIA W SYSTEMIE KNX.....</b>	<b>118</b>
<b>6.4. WERYFIKACJA DZIAŁANIA OPRACOWANEGO UKŁADU STEROWANIA OŚWIETLENIEM ...</b>	<b>126</b>

<b>6.5. OSZCZĘDNOŚCI ENERGII WYNIKAJĄCE Z ZASTOSOWANIA OPRACOWANEGO UKŁADU STEROWANIA OŚWIETLENIEM .....</b>	<b>129</b>
<b>6.6. ANALIZA EKONOMICZNA WDROŻENIA INTELIGENTNEGO SYSTEMU KNX DO STEROWANIA OŚWIETLENIEM.....</b>	<b>142</b>
<b>7. PODSUMOWANIE WYNIKÓW PRACY.....</b>	<b>146</b>
<b>8. LITERATURA.....</b>	<b>149</b>

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW I OZNACZEŃ

Oznaczenie	Uproszczona definicja	Jednostka
$E_K$	energia końcowa	kWh/(m <sup>2</sup> ·rok)
$E_U$	energia użytkowa	kWh/(m <sup>2</sup> ·rok)
$\gamma$	kąt azymutalny Słońca	°
$\omega$	kąt bryłowy	sr
$\theta$	kąt padania promieniowania na powierzchnię pochyloną	°
$\alpha$	kąt wzniesienia Słońca	°
$\tau$	kąt zenitalny Słońca	°
$L$	luminancja	cd/m <sup>2</sup>
$L_{VZ}$	luminancja nieboskłonu	cd/m <sup>2</sup>
$P_o$	moc opraw oświetleniowych	W
$H$	naświetlenie	lx·s
$E$	natężenie oświetlenia, gęstość strumienia oświetlenia	lx
$I_e$	natężenie promieniowania	W/m <sup>2</sup>
PLC	programmable Logic Controller (kontroler programowalny)	–
$D$	równomierność oświetlenia	–
$\Delta$	równomierność natężenia oświetlenia	–
$\eta$	skuteczność świetlna źródła światła	lm/W
S	strona południowa świata (ang. South)	–
N	strona północna świata (ang. North)	–
$E^-$	średnie natężenie oświetlenia na oświetlanej płaszczyźnie	lx
$\varphi$	strumień świetlny	lm
$I$	światłość – natężenie strumienia źródła światła	cd
KNX	światowy standard automatyki budynkowej	–
$T_c$	temperatura barwowa światła	K
$R$	wskaźnik luminancji	–
$EP$	wskaźnik rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną	kWh/(m <sup>2</sup> ·rok)
$I_{De}$	wskaźnik głębokości	–
$I_T$	wskaźnik przejrzystości	–
$I_O$	wskaźnik przeszkody	–
$\rho$	współczynnik odbicia	–
$CRI$	współczynnik oddawania barw	–

## STRESZCZENIE

Niniejsza rozprawa doktorska ma charakter interdyscyplinarny. Omawiane zagadnienia mieszczą się w obszarze elektrotechniki, systemów automatyki, energetyki słonecznej, informatyki oraz ekonomii. Dysertacja składa się z siedmiu rozdziałów, które można podzielić na dwie zasadnicze części. Na pierwszą część składają się dwa początkowe rozdziały, które poświęcone są analizie teoretycznej podstawowych zagadnień związanych z tematyką rozprawy. Dokonano w nich przeglądu literatury dotyczącej efektywności energetycznej obiektów, wykorzystania światła dziennego do oświetlenia pomieszczeń, jak również zagadnień związanych ze sterowaniem oświetleniem. W drugiej części rozprawy znajdują się rozdziały poświęcone przeprowadzonym badaniom, z uwzględnieniem metodologii, budowy układu pomiarowego, analizy i implementacji wyników pomiarów. Opisane zostały algorytmy sterowania oświetleniem, a także przeprowadzona została analiza ekonomiczna opłacalności implementacji zaproponowanych rozwiązań sterowania, bazujących na systemie KNX, które dedykowane są zarówno do nowych jak i modernizowanych obiektów. Głównym celem rozprawy było opracowanie układu sterowania oświetleniem, który na podstawie przeprowadzonych badań rozkładu natężenia światła, steruje oświetleniem sztucznym w sposób zapewniający maksymalne wykorzystanie światła dziennego oraz równomierny rozkład natężenia oświetlenia w całym pomieszczeniu. Autor opisał za pomocą zależności matematycznych, wyznaczone na podstawie wyników badań rozkładu natężenia oświetlenia, charakterystyczne dla analizowanych pomieszczeń. Umożliwia to efektywne sterowanie oprawami oświetleniowymi na podstawie pomiaru natężenia oświetlenia pochodzącego z jednego czujnika. Uzyskanie takich efektów zapewnia wysoki komfort użytkownika pomieszczeń i co najważniejsze, wprowadza wymierne oszczędności w zużyciu energii elektrycznej w obwodach oświetleniowych.

W dysertacji szczególną uwagę poświęcono rozwiązaniom sterowania oświetleniem, które mogą wprowadzić oszczędności w zużyciu energii elektrycznej w instalacjach oświetleniowych, co zostało sformułowane w tezie badawczej:

***„Efektywność energetyczną instalacji oświetleniowych można poprawić poprzez zastosowanie algorytmu sterowania wykorzystującego formuły matematyczne opisujące rozkłady natężenia oświetlenia wyznaczone przy użyciu matrycy fotometrycznej”.***



Do weryfikacji wyżej wymienionej tezy zastosowano szereg metod badawczych:

- przeanalizowano literaturę dotyczącą wpływu światła naturalnego na oświetlenie pomieszczeń oraz sposoby sterowania oświetleniem sztucznym pod kątem wykorzystania światła dziennego;
- w celu dokonania pomiarów rozkładu natężenia światła dziennego w pomieszczeniu, opracowano i zbudowano autorski układ matrycy pomiarowej składającej się z 16 bezprzewodowych czujników natężenia oświetlenia, jednostki sterującej i archiwizującej dane pomiarowe;
- na podstawie otrzymanych wyników badań, wyznaczono charakterystyczne parametry rozkładu natężenia oświetlenia, które zostały zaimplementowane do systemu sterowania oświetleniem opartego na standardzie KNX;
- przeanalizowano algorytmy sterowania oświetleniem dla różnych rozwiązań systemowych, przeprowadzono analizę ekonomiczną dla wybranego algorytmu sterowania oświetleniem i wykazano wielkość oszczędności w zużyciu energii elektrycznej w instalacjach przy jednoczesnym, maksymalnym udziale światła dziennego do oświetlenia pomieszczeń.

W ostatnim rozdziale dokonano podsumowania efektów pracy oraz sformułowano płynące z przedstawionych badań i analiz syntetyczne wnioski.

## ABSTRACT

This dissertation has an interdisciplinary character. The discussed issues include electrical engineering, automation systems, solar energy, and economics. It consists of seven chapters, divided into two major groups. The first two chapters focus on the theoretical analysis of the basic issues related to the dissertation's subject matter. The second part of the dissertation includes chapters devoted to the conducted research, including methodology, the construction of the measurement system, and the analysis and implementation of measurement results. It describes lighting control algorithms, and it conducts an economic analysis of the cost-effectiveness of implementing the proposed control solutions, based on the KNX system, which is dedicated to both - new and retrofitted facilities. The main objective of the dissertation was to develop a lighting control system using light intensity distribution studies to control artificial lighting in a way that maximizes the use of daylight and uniformly distributes illumination throughout the room. Obtaining such effects provides high comfort for room use and, most importantly, gives measurable savings in electricity consumption in lighting circuits.

The dissertation pays special attention to lighting control solutions that can introduce savings in electricity consumption in lighting installations, as formulated in the research thesis: **“The energy efficiency of lighting installations can be improved by applying a control algorithm that uses mathematical formulas describing illuminance distributions determined using a photometric matrix”**.

To verify the thesis, several research methods were used:

- what was also analyzed was the literature on the effects of natural light on room lighting and how to control the artificial lighting to take advantage of daylight.
- to measure the distribution of daylight intensity in a room, and as follows an authored measurement matrix system consisting of 16 wireless illuminance sensors, a control unit, and archiving of measurement data was developed and built;
- based on the obtained test results, the distinctive parameters of the illuminance distribution were determined and implemented into a lighting control system based on the KNX standard;
- there were developed lighting control algorithms for various system solutions, an economic analysis of the developed lighting algorithms was carried out, and the amount of savings in electricity consumption in the installations while maximizing the share of daylight for room illumination was demonstrated. The dissertation ends with a discussion and conclusions that result from the research and analysis.

## 1. WPROWADZENIE

Energia elektryczna stanowi około 20% całkowitego końcowego zużycia energii na świecie, przez co wpisuje się we wszystkie aspekty naszego codziennego życia. Zakłada się, że do 2050 roku populacja na świecie zwiększy się o około 20% i osiągnie 9,6 miliarda ludzi. Bardziej zamożny i zaludniony świat będzie potrzebował o ponad 90% więcej energii, niż obecnie [1]. Rozwój technologii oraz wzrost konsumpcji powodują zwiększone zapotrzebowanie na energię elektryczną, zarówno w przemyśle jak i sektorach publicznych i prywatnych. Głównymi surowcami naturalnymi wykorzystywanymi do produkcji energii elektrycznej na świecie są paliwa kopalne. Stanowią one obecnie 81% łącznego udziału w wytwarzaniu energii elektrycznej [40]. Tak znaczący udział paliw kopalnych w procesie wytwarzania energii elektrycznej ma negatywne skutki dla środowiska w postaci jego degradacji oraz zanieczyszczenia [9], [10]. Dostające się do atmosfery zanieczyszczenia, takie jak np. CO<sub>2</sub>, są główną przyczyną zmian klimatycznych na Ziemi [64], [112]. Globalne ocieplenie stało się faktem, a walka z jego skutkami jest obecnie największym wyzwaniem dla całej ludzkości. Z uwagi na takie zagrożenia istnieje konieczność podejmowania działań zmierzających do ograniczenia zużycia energii elektrycznej, a co za tym idzie, również paliw kopalnych. W ostatnich latach coraz większy nacisk zostaje położony na ograniczenie zużycia energii poprzez poprawę efektywności energetycznej obiektów [124]. Odpowiednie dyrektywy, ustawy i przepisy, nakazują całym krajom, miastom, przedsiębiorstwom i użytkownikom budynków, wprowadzenie działań zmierzających do ograniczenia zużycia energii elektrycznej. Niestabilna sytuacja na rynku energii, związana z gwałtownym wzrostem cen i brakiem ich stabilności, wymusiła także na rządzie Polski, wprowadzenie ustawy, która nakłada obowiązek zmniejszenia zużycia energii elektrycznej o 10% w jednostkach sektora finansów publicznych [142]. Inne przykłady obowiązujących zapisów legislacyjnych dotyczących efektywności energetycznej zostały przedstawione w rozdziale 2.1.3.

Poprawa efektywności energetycznej budynków to nie tylko nowa tendencja wśród właścicieli i zarządców obiektów. Wiele krajów na świecie, w tym także kraje członkowskie Unii Europejskiej, w różny sposób koncentrują się na zapewnieniu bezpieczeństwa energetycznego i rozwiązywaniu pilnych problemów energetycznych w zależności od ich odmiennego rozwoju gospodarczego, infrastruktury energetycznej, dostępności surowców energetycznych oraz stosunków gospodarczych i społecznych z importerami zasobów energetycznych. Zdaniem ekspertów, bezpieczeństwo energetyczne na światowym i europejskim rynku energii można osiągnąć poprzez koordynację polityk krajowych krajów

członkowskich Unii Europejskiej oraz realizację zintegrowanego rynku energii, dywersyfikację źródeł importu i zapewnienie bezpiecznych dostaw energii [80].

Zakres niniejszej rozprawy wpisuje się w wyżej wymienione trendy, a dodatkowo przedstawione wyniki badań mogą być wykorzystane do urealniania celów zawartych w dokumencie zatwierdzonym przez Komisję Europejską, nazwanym pakietem 55 "Fit for 55" [140]. Co więcej, efekty pracy mogą przyczynić się do osiągnięcia kilku celów zrównoważonego rozwoju SDG (ang. *Sustainable Development Goals*), tj.: celu 7.: *Czysta i dostępna energia*; celu 11.: *Zrównoważone miasta i społeczności*; celu 13.: *Działania w dziedzinie klimatu*; a także w mniejszym stopniu celu 9.: *Innowacyjność, przemysł i infrastruktura*; i celu 12.: *Odpowiedzialna konsumpcja i produkcja* [8], [57]. Zastosowanie przedstawionych systemów sterowania oświetleniem w budynkach użyteczności publicznych, np. edukacyjnych, może przyczynić się do wywiązania z ustawowego obowiązku ograniczenia zużycia energii o 10%.

Autor wykonał ponad 3200 pomiarów natężenia światła dziennego w 16 punktach sal dydaktycznych, jednej położonej od strony południowej (S), a drugiej od strony północnej (N). Uzyskane wyniki posłużyły do zamodelowania systemu i opracowania algorytmów sterowania oświetleniem w sposób umożliwiający uzyskanie równomiernego rozkładu natężenia oświetlenia na całej powierzchni pomieszczenia. Pozwoliło to na zmniejszanie zużycia energii elektrycznych przez poszczególne oprawy oświetleniowe zainstalowane w badanych pomieszczeniach. Przyczyniło się również do wprowadzenia oszczędności w zużyciu energii elektrycznej w instalacjach oświetleniowych. W niniejszej dysertacji wykazano, że znajomość rozkładu natężenia światła dziennego w danym pomieszczeniu pozwala na zastosowanie odpowiednich systemów sterowania oświetleniem zapewniając wymagane natężenie oświetlenia przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia energii elektrycznej. W pracy oszacowano wielkość uzyskanej oszczędności dla całego obiektu oraz dokonano analizy czasu zwrotu implementacji zaproponowanego układu sterowania. Wskazano także na korzyści wynikające z ograniczenia zużycia energii w odniesieniu do zmniejszenia emisji CO<sub>2</sub> do atmosfery.

## 2. OŚWIETLENIE W ASPEKTCIE EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ

Energia elektryczna stanowi najważniejszy składnik światowej gospodarki. W 1982 r. światowa produkcja energii elektrycznej wynosiła 9753 TWh. W roku 2022 wyprodukowano na świecie 28660 TWh [104]. Niemal 200% wzrost produkcji energii w przedstawionym okresie wynika głównie ze wzrostu gospodarczego, zwiększonego zapotrzebowania na energię elektryczną poprzez wzrastającą konsumpcję. Wpływ na zwiększenie zapotrzebowania na energię elektryczną ma także pojawienie się we współczesnym świecie nowych sektorów, takich jak pojazdy elektryczne (EV), pompy ciepła itp. W 2021 roku do całkowitej światowej produkcji energii elektrycznej wykorzystywano różne nośniki energii. Najwięcej, bo blisko 100% energii, którą wytworzono w elektrowniach atomowych, to była energia elektryczna. Jeszcze wciąż bardzo dużo, bo 59% przekonwertowanej energii pochodzącej z węgla, przeznaczono na wytworzenie energii elektrycznej. Co bardzo ważne, ponad połowa, czyli 52% produkcji z odnawialnych źródeł energii, stanowiła właśnie energia elektryczna. Natomiast 34% stanowił udział z łącznej produkcji energii pochodzącej z ropy naftowej, który został wykorzystany do wytworzenia energii elektrycznej. Dla gazu ziemnego wynosił on jedynie 4% [151]. Międzynarodowa Agencja Energetyczna przewiduje do 2050 roku blisko 50% wzrost zużycia energii, w porównaniu do stanu z roku 2018. Szacuje się, że większość tego wzrostu ma przypadać na szybko rozwijające się gospodarki krajów Azji, które nie należą do Organizacji Współpracy Gospodarczej i Rozwoju (OECD) [101]. Znaczny udział paliw kopalnych w produkcji energii elektrycznej ma bezpośrednie przełożenie na emisję szkodliwych substancji do atmosfery, a w konsekwencji przyczynia się do degradacji środowiska naturalnego [14], [147]. W tej sytuacji należy poszukiwać i korzystać z niskoemisyjnych źródeł wytwarzania energii elektrycznej. Najwłaściwszym kierunkiem w odchodzeniu od paliw kopalnych jako surowca do wytwarzania energii elektrycznej jest wykorzystywanie odnawialnych źródeł energii, takich jak np. energia słońca, wiatru, wody czy biogazu [22]. Nowym nośnikiem energii, który może rozwinąć technologię wytwarzania energii elektrycznej jest wodór. Odnawialne źródła energii jako jeden ze sposobów na obniżenie zużycia energii dostarczanej przez zewnętrznych dostawców, zostały wspomniane w rozdziale 2.1.5 niniejszej dysertacji.

Efektywność energetyczna jest obecnie często używanym pojęciem i ma bezpośredni związek z oszczędnością zużycia zasobów energetycznych w budynkach, a co się z tym wiąże, przyczynia się do ochrony środowiska [119]. Kraje członkowskie Unii Europejskiej w różny

sposób koncentrują się na zapewnieniu bezpieczeństwa energetycznego i rozwiązywaniu pilnych problemów energetycznych w zależności od ich stopnia rozwoju gospodarczego, infrastruktury energetycznej, dostępności surowców energetycznych oraz stosunków politycznych z importerami zasobów energetycznych. Zdaniem ekspertów, bezpieczeństwo energetyczne na europejskim rynku energii można osiągnąć poprzez koordynację polityk poszczególnych krajów członkowskich Unii Europejskiej oraz realizację zintegrowanego rynku energii, dywersyfikację źródeł importu i zapewnienie bezpiecznych dostaw energii [79]. Istotnym czynnikiem jest dostarczanie do odbiorców jak największej ilości energii pochodzącej z niskoemisyjnych źródeł. Takie działania przyczyniają się do poprawy wskaźników energetycznych obiektów, których jednym z elementów jest jak największy udział "zielonej energii" w końcowym bilansie energetycznym. Ogólnie rzecz biorąc, polityka energetyczna Unii Europejskiej koncentruje się na ograniczaniu zużycia paliw kopalnych i zwiększaniu produkcji energii ze źródeł odnawialnych. Takie cele zostały po raz pierwszy postawione przez Radę Unii Europejskiej już w 1997 r.

Znaczący udział węgla w strukturze wytwarzania energii oraz duża zależność od importu gazu ziemnego sprawiają, że Polska podejmuje działania i inicjatywy dotyczące sektora energetycznego, które nie wynikają z polityki energetycznej Unii Europejskiej. Mają one służyć głównie obronie suwerenności energetycznej oraz utrzymaniu cen energii na możliwie niskim poziomie. Polska preferuje model suwerenności energetycznej, który zakłada produkcję energii na podstawie maksymalnego wykorzystania rodzimych zasobów surowców energetycznych i technologii jej wytwarzania. Nasze państwo kieruje się ponadto wymogiem dywersyfikacji źródeł i kierunków dostaw, w przypadku konieczności importu tych surowców. W takich uwarunkowaniach problematyczne dla Polski stają się, z punktu widzenia realizacji celów polityki energetycznej Unii Europejskiej, działania, które zmierzają do maksymalnego wykorzystania krajowych surowców energetycznych. Budowa nowych węglowych bloków energetycznych, zahamowanie rozwoju OZE, jest zaprzeczeniem unijnych kierunków rozwoju sektora energetycznego.

Jednym z celów strategicznych polityki energetycznej i ekologicznej państw członkowskich Unii Europejskiej jest poprawa efektywności energetycznej gospodarki, w tym obiektów użyteczności publicznej i mieszkalnych. Niesie to za sobą wzrost kosztów inwestycyjnych, jednak jednoczesny wzrost jednostkowych cen nośników energii sprawia, że wiele nowych technologii budowlanych staje się ekonomicznie opłacalnych, a wznoszenie efektywnych energetycznie budynków jest uzasadnione. Poziom efektywności energetycznej

budynków jest zazwyczaj opisywany przez ich standard energetyczny, który z kolei określa maksymalną dopuszczalną wielkość zużycia przez budynek energii pierwotnej, końcowej albo użytkowej, wyrażoną najczęściej w kWh/(m<sup>2</sup>·rok). Standard energetyczny może być narzucony przez przepisy prawne, np. rozporządzenie ministra właściwego ds. budownictwa lub zdefiniowany przez twórców danej technologii, np. standard budynku pasywnego. W skład oceny klasy energetycznej wchodzi poziom zużycia energii do celów: oświetlenia, podgrzania wody, ogrzewania, chłodzenia i wentylacji. Najwięcej energii zużywa się na ogrzanie obiektów, dlatego bardzo ważne jest określenie jakości cieplnej. Jakość energetyczną budynku charakteryzują wskaźniki oznaczane najczęściej literką E z odpowiednimi indeksami. Ich wartości uzyskuje się poprzez podzielenie energii netto, brutto (dostarczonej), a także energii pierwotnej niezbędnej do ogrzania, chłodzenia, podgrzania wody, wentylacji i oświetlenia budynku przez kubaturę lub powierzchnię pomieszczeń ocenianego obiektu. Wskaźniki i odpowiednie parametry muszą pochodzić z zadanego przedziału czasowego. Zwykle dotyczą jednego roku. To na tej podstawie możliwe jest sformułowanie oceny jakości energetycznej budynku poprzez przyporządkowanie klasy energetycznej, która jest definiowana z przedziału od A do G.

Efektywność energetyczna wiąże się bezpośrednio z wykorzystaniem i użytkowaniem energii. Pojęcie efektywności energetycznej jest bardzo szerokie, ale w odniesieniu do obiektów, oznacza przede wszystkim zależność pomiędzy dostarczaną energią elektryczną i ciepłem, a zużyciem tych nośników w obiekcie. Definicja efektywności energetycznej została określona w ustawie o efektywności energetycznej z 2016 roku [141] i definiuje się ją, jako stosunek otrzymanego rezultatu do ilości energii zużytej w celu osiągnięcia tego efektu. Zatem możemy określić efektywność energetyczną obiektu jako sprawność energetyczną. Parametr efektywności energetycznej będzie wskazywał na stopień zapewniania komfortu użytkownika obiektu przy jednoczesnym maksymalnym ograniczeniu zużycia energii elektrycznej i ciepła.

Dążenie do poprawy efektywności energetycznej budynków to przede wszystkim możliwość obniżenia kosztów energii elektrycznej i ciepła w obiektach. W dalszej konsekwencji to również działanie proekologiczne, mające na celu ograniczenie zużycia paliw kopalnych, które w większości wykorzystywane są do systemowej produkcji energii elektrycznej i ciepła. Wszelkie działania projektantów, wykonawców i użytkowników budynków, zmierzają do jak najbardziej efektywnego zarządzania zużyciem energii elektrycznej i ciepła w obiektach. Należy pamiętać, że poprawa efektywności energetycznej obiektów oznacza zmniejszenie zużycia energii elektrycznej i ciepła, przy jednoczesnym

zapewnieniu komfortu cieplnego, wymaganych parametrów temperatury, oświetlenia oraz prawidłowego funkcjonowania urządzeń. Duży nacisk na poprawę efektywności energetycznej obiektów jest wynikiem nie tylko dążenia do oszczędności, ale jest także koniecznością wynikającą z uregulowań prawnych, zarówno unijnych, jak i krajowych.

Rosnące koszty energii elektrycznej i związane z jej produkcją zagrożenia dla środowiska naturalnego, wymusiły poszukiwanie tańszych, efektywniejszych i bardziej przyjaznych środowisku naturalnemu rozwiązań ograniczania zużycia energii. Zmieniające się normy budowlane i wytyczne dotyczące efektywności energetycznej budynków zachęcają, a czasem zmuszają architektów, inwestorów i właścicieli budynków do wykorzystywania nowych technologii, materiałów i zasobów odnawialnych źródeł energii, w tym np. światła dziennego. Natomiast nowoczesne technologie umożliwiają realizację ambitnych projektów i pozwalają na poprawę warunków życia i pracy tam, gdzie dotąd nie było to możliwe. W ostatniej dekadzie coraz większą popularnością cieszą się systemy energetyki odnawialnej, które są coraz bardziej powszechnie stosowane, zarówno w budownictwie mieszkaniowym, jak i obiektach użyteczności publicznej. Jednym z rodzajów darmowej energii, którą oferuje nam natura jest energia słoneczna. Może być ona wykorzystana do ogrzewania obiektu, poprzez zastosowanie kolektorów słonecznych oraz wytwarzanie energii elektrycznej w ogniwach fotowoltaicznych. Należy także wskazać, że energia promieniowania słonecznego może w sposób naturalny (bezpośrednio) zapewniać odpowiednie oświetlenie pomieszczeń. W takim przypadku nie będzie występowała konieczność wykorzystywania oświetlenia sztucznego w sposób ciągły.

Jednym z najważniejszych czynników zapewniających właściwe warunki pracy, odpoczynku i użytkowania pomieszczeń jest oświetlenie [120]. Zastosowanie różnego rodzaju źródeł światła może oddziaływać w różny sposób na odczucia wzrokowe użytkownika. Odpowiednio dobrane i zaaranżowane oświetlenie może optycznie powiększać lub pomniejszać pomieszczenie. Może także stwarzać przyjazny klimat do pracy czy odpoczynku. Z drugiej strony, źle dobrane i zaprojektowane oświetlenie może wywołać negatywne skutki, powodując, np. uczucie zmęczenia czy wrażenie rozproszenia uwagi. Pozytywne czy negatywne odczucia związane z oświetleniem są szczególnie zauważane przy zastosowaniu automatyki sterowania oświetleniem. Dobrze dobrane algorytmy sterowania oświetleniem mogą zapewnić wysoki poziom komfortu użytkownika, natomiast źle zaprogramowana automatyka może powodować dyskomfort u osoby przebywającej w pomieszczeniu, a w skrajnych przypadkach zdenerwowanie uniemożliwiające dalsze przebywanie w danym miejscu.



Zapewnienie właściwego oświetlenia jest uzależnione od szeregu czynników, które wynikają z położenia obiektu, estetyki, psychofizjologii oraz ekonomii. Należy pamiętać, że niezapewnienie wymaganej ilości światła może w znacznym stopniu przyczynić się do znacznego spadku wydajności, obniżenia koncentracji, a także do zmęczenia.

Bardzo istotną rolę w oświetleniu pomieszczeń odgrywa światło dzienne. Człowiek czuje się komfortowo w dobrze oświetlonych pomieszczeniach, ponieważ ponad 80% bodźców zewnętrznych odbiera poprzez narząd wzroku. Ponadto fizjologia widzenia sprawia, że światło dzienne jest najkorzystniejsze przy wykonywaniu wszelkich prac, a także podczas odpoczynku. Należy, zatem dążyć do jak najbardziej efektywnego i maksymalnego wykorzystania światła dziennego do oświetlenia wnętrza. Parametry oświetlenia wnętrza są dokładnie określone w normach i przepisach. Określa się w nich minimalne wartości natężenia oświetlenia w obiektach, w zależności od charakteru i sposobu użytkowania oraz ich przeznaczenia.

Wykorzystanie światła dziennego do oświetlenia pomieszczeń ma bezpośredni związek z efektywnością energetyczną [118]. Zapewniając wystarczające natężenie światła dziennego, możemy obniżyć zużycie energii w instalacjach oświetleniowych pomieszczeń poprzez wyłączenie bądź zmniejszenie mocy źródeł oświetlenia sztucznego. Efektywne wykorzystanie światła dziennego do oświetlenia pomieszczeń możliwe jest przy zastosowaniu odpowiedniej automatyki i algorytmów sterowania obwodami zasilającymi oprawy oświetleniowe. Urządzenia realizujące odpowiednie sterowanie muszą posiadać dokładne dane związane z natężeniem światła dziennego w danym pomieszczeniu. Światło zewnętrzne trafiające do pomieszczenia posiada parametry zależne od wielu czynników związanych z obiektem, jego otoczeniem oraz rodzajem wnętrza, do którego dociera.

Zapewnienie wymaganego natężenia oświetlenia jest istotnym elementem projektu, instalacji oświetleniowej. Odpowiedni, wymagany normami poziom oświetlenia pomieszczeń jest uzależniony od specyfiki obiektu, pomieszczenia czy wykonywanych w nich czynności. Szczególną uwagę zwraca się na parametry natężenia oświetlenia w budynkach użyteczności publicznej, w których spełnienie wymagań norm i wytycznych oświetlenia danych pomieszczeń, jest szczególnie przestrzegane i poddawane kontroli. Budynki użyteczności publicznej, do których wg rozporządzenia [88] zaliczamy m.in. obiekty przeznaczone dla administracji publicznej, oświaty, opieki zdrowotnej itp., posiadają często bardzo rozbudowane instalacje oświetleniowe.

Zużycie energii elektrycznej na oświetlenie w obiektach użyteczności publicznej wynosi 25-35% całkowitego zużycia energii elektrycznej w budynku [2]. W domach mieszkalnych

udział w całkowitym zużyciu energii elektrycznej na oświetlenie jest mniejszy i wynosi około 20–30% [23]. Analiza istniejących rozwiązań oraz prowadzonych badań w zakresie wykorzystania światła dziennego do oświetlenia pomieszczeń wykazała, że stosowane rozwiązania koncentrują się na technologii materiałowej elementów odpowiedzialnych za dostęp światła dziennego w pomieszczeniach. Natomiast w zakresie układów sterowania stosowane są układy, które sterują natężeniem oświetlenia w sposób automatyczny, będąc wcześniej zaprogramowanymi przez instalatora, zgodnie z preferencjami użytkowników. Wszystkie działania dotyczące oświetlenia opierają się na odpowiednich normach i przepisach dotyczących odpowiednich obiektów. Często obiekty użyteczności publicznej są budowane, jako obiekty o dużych kubaturach, przestrzeniach, przeszkleniach, co powoduje, że potrzebna jest duża ilość energii do ich oświetlenia, ogrzania bądź chłodzenia. Duża część wspomnianych budynków pracuje w trybie wielogodzinnym [2]. Tego typu obiekty, w porównaniu do pozostałych, zużywają znaczną część energii elektrycznej, gdyż zazwyczaj posiadają bardzo dużą powierzchnię użytkową, w której pracuje wiele osób. Działania zmierzające do poprawy efektywności energetycznej obiektu, nawet w niewielkim zakresie są ważnym elementem w całym cyklu funkcjonowania budynku. Osiągnięcie niewielkiego wzrostu efektywności energetycznej przynosi już duże, wymierne korzyści finansowe. Jeśli dodamy do tego podniesienie komfortu użytkowania oraz wzrost bezpieczeństwa w obiektach, to działania związane z implementacją autonomicznych systemów sterowania instalacjami, stają się bardzo ważnym i przyszłościowym zagadnieniem.

Współczesne inteligentne systemy sterowania instalacjami, w tym oświetleniowymi, oferują nieporównywalnie większe możliwości uzyskiwania oszczędności, niż te zamontowane w niedalekiej przeszłości [43]. Jednak niezmiennie kluczowym elementem są dane wejściowe, wykorzystywane przez urządzenia sterujące i wykonawcze, które na podstawie odpowiednich algorytmów, sterują instalacjami i nadzorują procesy związane z przepływem energii w obiekcie. Należy także zauważyć, że zwiększenie efektywności energetycznej obiektów ma wpływ na gospodarkę energetyczną, ogranicza wzrost zapotrzebowania na paliwa i energię, tym samym przyczyniając się do zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego kraju [57], [76], [87]. W konsekwencji zmniejsza się uzależnienie od dostaw surowców z zagranicy, a także przekłada się to na ograniczenie oddziaływania energetyki na środowisko naturalne przez redukcję emisji szkodliwych substancji, w tym CO<sub>2</sub>.

## 2.1. EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA OBIEKTÓW

### 2.1.1. Definicja i pojęcia podstawowe

W okresie ostatnich 20 lat zużycie energii elektrycznej na świecie wzrosło o ponad 88%, z 2137 TWh w roku 1989 do 22847 TWh w roku 2019 [104]. Przewiduje się, że globalne zapotrzebowanie na energię gwałtownie wzrośnie w ciągu najbliższych 25 lat i do 2050 roku będzie o 50% większe niż w roku 2018 [48]. W celu ograniczenia końcowego zużycia energii elektrycznej i ciepła, coraz więcej badań koncentruje się na efektywnym wykorzystaniu energii elektrycznej. Zwiększanie efektywności energetycznej obiektów może być realizowane m.in. poprzez wykorzystywanie odnawialnych źródeł energii. Wykorzystanie energii pochodzącej z odnawialnych źródeł w znaczący sposób obniża emisję szkodliwych substancji wytwarzanych w procesie produkcji energii elektrycznej i ciepła z paliw kopalnych. Powstają scenariusze zakładające ścieżki dla globalnego sektora energetycznego, aby osiągnąć zerowe emisje CO<sub>2</sub> netto do 2050 r. [58]. Efektywność energetyczna i neutralność emisyjna to warunki konieczne jakim muszą sprostać współczesne ekologiczne budynki.

Pod pojęciem efektywności energetycznej obiektów można rozumieć możliwość oszczędności energii i ciepła zużywanych przez obiekt w trakcie jego normalnego użytkowania. Najczęściej podejmowanymi działaniami w zakresie zmniejszenia zużycia energii elektrycznej i ciepła w budynku, są wprowadzane rozwiązania związane przede wszystkim z ograniczeniem zużycia ciepła [111]. Działania te dotyczą również budynków użyteczności publicznej i polegają najczęściej na wykonaniu izolacji termicznej ścian i dachu budynku [108]. Następnie wymieniana jest stolarka okienna i drzwiowa. Oszczędność w zużyciu energii elektrycznej realizowana jest najczęściej poprzez zastępowanie tradycyjnych żarowych i świetlówkowych źródeł oświetlenia nowoczesnymi źródłami typu LED. W pierwszej kolejności dotyczy to domów i budynków mieszkalnych. W dalszej kolejności modernizacje związane z oszczędnością w zużyciu mediów energetycznych, dotyczą biurowców, obiektów użyteczności publicznej, zakładów pracy i firm. W celu zobligowania przedsiębiorstw do działań na rzecz poprawy efektywności energetycznej, wprowadzono ustawy o obowiązkach wykonania okresowego audytu energetycznego budynków [106]. Jest to proces mający na celu przeprowadzenie szczegółowych i potwierdzonych obliczeniami przedsięwzięć, które będą służyły poprawie efektywności energetycznej. Wykonany audyt dostarcza także informacji o potencjalnych wielkościach i miejscach, w których można zaoszczędzić energię.

Efektywność energetyczna jest też pojęciem, które ma swoje usankcjonowanie w przepisach, normach i dyrektywach. Niniejsza dysertacja szczególnie koncentruje się na

obiektach użyteczności publicznej. W myśl definicji zawartej w rozdziale 1, § 3, pkt 6 Dziennika Ustaw [89], takim budynkiem nazywamy budynek przeznaczony na potrzeby administracji publicznej, oświaty, kultury, szkolnictwa wyższego, nauki, handlu, gastronomii, usług itp. Za budynek użyteczności publicznej uznaje się także budynek biurowy lub socjalny. Ważnym dokumentem, który reguluje zasady i metodologię wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku jest Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z 2015 r. W dokumencie znajdują się definicje, wzory i pojęcia niezbędne do prawidłowego wyznaczania charakterystyki energetycznej budynków oraz sporządzania świadectw charakterystyki energetycznej. Na tej podstawie zostały przedstawione w rozdziale 2.1.2 oznaczenia i wzory.

### **2.1.2. Klasy energetyczne budynku – kryteria klasyfikacji**

Dla ujednoczenia i usystematyzowania parametrów energetycznych budynków, wydzielono kilka klas efektywności energetycznej obiektów, które opisywane są liczbowo ilością energii elektrycznej i ciepła zużywanego w obiekcie w ciągu jednego roku, przeliczoną na  $1 \text{ m}^2$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). Klasy energetyczne budynków to system oceny, który określa, jak efektywnie budynek zużywa energię w kontekście ogrzewania, chłodzenia, wentylacji i oświetlenia. Dla ogrzewania i wentylacji jest to wskaźnik sezonowego zapotrzebowania na energię, odniesiony do  $1 \text{ m}^2$  powierzchni budynku. Dla przygotowania ciepłej wody jest to wskaźnik energii na podgrzanie  $1 \text{ m}^3$  wody, a dla oświetlenia jest to średnioważony wskaźnik mocy urządzeń oświetleniowych, odniesiony do  $1 \text{ m}^2$  powierzchni budynku. Rozróżnia się siedem klas energetycznych dla budynków od A+ (najwyższa efektywność energetyczna) do G (najniższa efektywność energetyczna). Parametrem decydującym o przynależności budynku do odpowiedniej klasy jest wartość zintegrowanego wskaźnika charakterystyki energetycznej budynku EP. Podział klas energetycznych dla budynków przedstawiono w sposób graficzny na rysunku 2.1 [141].

W celu określenia klas energetycznych budynków, jak i sporządzania dla nich certyfikatów, charakterystyk energetycznych, posługujemy się trzema rodzajami energii:

- energia pierwotna EP – jest energią pozyskiwaną bezpośrednio z zasobów naturalnych, zarówno odnawialnych jak i nieodnawialnych;
- energia użytkowa EU – to energia, która jest efektywnie wykorzystywana do ogrzewania, wentylacji pomieszczeń, a także przygotowywania ciepłej wody użytkowej na potrzeby użytkowników;

- energia końcowa EK – określa ilość energii jaką należy dostarczyć do obiektu, zakupić w celu zapewnienia funkcjonowania wentylacji mechanicznej, klimatyzacji, a także do przygotowania ciepłej wody użytkowej.

Wskaźnik EP dla budynku określa ilość nieodnawialnej energii pierwotnej potrzebnej na ogrzewanie, oświetlenie, chłodzenie, wentylację, a także na produkcję ciepłej wody użytkowej. Od 1 stycznia 2021 roku wartość EP dla nowo powstających budynków powinna wynosić 70 kWh/(m<sup>2</sup>·rok). Wcześniej wartość ta wynosiła 95 kWh/(m<sup>2</sup>·rok). Powodem zmniejszenia zapotrzebowania jest fakt, że nieustannie dążymy do budowy obiektów, domów i mieszkań, które będą zużywały coraz mniej energii na ogrzewanie, oświetlenie czy wentylację. Drugim istotnym powodem jest coraz większa świadomość energetyczna wśród mieszkańców i dbałość o środowisko naturalne [115]. Skutkuje to coraz częstszym wybieraniem np. pomp ciepła jako źródła ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej, zamiast np. tradycyjnych kotłów węglowych. Aktualnie ocena charakterystyki energetycznej budynku zawiera:

- wskaźnik rocznego zapotrzebowania na energię końcową (EK);
- wskaźnik rocznego zapotrzebowania na energię użytkową (EU);
- wskaźnik rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną (EP);
- jednostkową wielkość emisji CO<sub>2</sub>;
- udział odnawialnych źródeł energii w rocznym zapotrzebowaniu na energię końcową.

Maksymalną wartość wskaźnika rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną EP oblicza się zgodnie z poniższym wzorem:

$$EP = EP_{H+W} + \Delta E_{PC} + \Delta E_{PL} \quad [\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})]$$

gdzie:

$EP_{H+W}$  – cząstkowa wartość wskaźnika EP na potrzeby ogrzewania, wentylacji przygotowania ciepłej wody użytkowej,

$\Delta E_{PC}$  – cząstkowa wartość wskaźnika EP na potrzeby chłodzenia,

$\Delta E_{PL}$  – cząstkowa wartość wskaźnika EP na potrzeby oświetlenia.

Ze wzoru wynika, że energia zużywana w instalacjach oświetleniowych budynku ma wpływ na wartość wskaźnika EP, a tym samym na standard energetyczny obiektu.

W odpowiedzi na wymogi unijne dotyczące zwiększenia efektywności energetycznej w budynkach, wprowadzono w Polsce w 2024 roku, klasy energetyczne budynków. Klasyfikacja ta wskazuje na roczne zużycie energii przez budynek oraz poziom emitowanych zanieczyszczeń. W ocenie przynależności do danej klasy energetycznej obiektu bierze się pod uwagę izolację termiczną, efektywność systemów grzewczych i instalacji oświetleniowych,

a także wykorzystanie odnawialnych źródeł energii. Przypisanie budynkowi odpowiedniej klasy energetycznej jest istotne ze względu na wpływ jaki ma na koszty utrzymania obiektu oraz oddziaływania na środowisko naturalne. Znając klasę energetyczną budynku można założyć jakie będą jego koszty eksploatacji oraz oczekiwać odpowiedniego komfortu i bezpieczeństwa użytkowania. Jednym ze sposobów oceny klasy energetycznej budynku, jest wykonanie świadectwa charakterystyki energetycznej. To dokument, który zawiera analizę i ocenę efektywności energetycznej budynku na podstawie takich czynników jak izolacja termiczna, systemy ogrzewania, wentylacji, rodzaj i zużycie energii oraz wykorzystanie energii odnawialnej. Świadectwo to jest wystawiane przez uprawnionego audytora energetycznego i określa zużycie energii pierwotnej, końcowej oraz użytkowej, a także udział źródeł odnawialnych oraz emisję CO<sub>2</sub>.



Rys. 2.1. Podstawowe obszary oszczędności wpływające na efektywność energetyczną wraz z wydzielonymi klasami energetycznymi dla budynków

Źródło: [Opracowanie własne]

Wśród klas energetycznych budynków, co do ich rodzaju, wyróżnia się budynki zeroenergetyczne, pasywne, niskoenergetyczne oraz energooszczędne [132]. Podział budynków na klasy energetyczne dokonuje się w oparciu o zapotrzebowanie energii odniesione do metra kwadratowego powierzchni domu, czyli na podstawie wartości wskaźnika EU. Klasa energetyczna jest przyznawana zgodnie z obowiązującymi Warunkami Technicznymi 2022 opublikowanymi w Dz.U. 2022 poz. 1225 (oznaczone skrótowo jako WT 2022). Ten wskaźnik określa zapotrzebowanie na energię pierwotną (EP), która wynosi 70 kWh na metr kwadratowy rocznie. W oparciu o ten wskaźnik określono osiem klas energetycznych budynków.

Do klasy energetycznej A+ należą obiekty, dla których wskaźnik charakterystyki energetycznej (EP) jest ujemny, co oznacza, że obiekt produkuje więcej energii niż jej zużywa.

To najwyższa klasa energetyczna, a budynki zakwalifikowane do tej klasy są obiektami o najwyższym udziale odnawialnych źródeł energii w pokryciu zapotrzebowania energetycznego w obiekcie. Nadmiar wygenerowanej energii elektrycznej i ciepła przekazywany jest najczęściej do innych obiektów.

Klasa A oznacza, że wartość zintegrowanego wskaźnika charakterystyki energetycznej (EP) jest mniejsza lub równa 0,25. W praktyce do tej klasy zaliczamy domy jednorodzinne zużywające rocznie mniej energii, niż 63 kWh/(m<sup>2</sup>·rok) oraz bloki i kamienice z wynikiem poniżej 59 kWh/(m<sup>2</sup>·rok). To budynki zeroenergetyczne (produkują tyle energii z odnawialnych źródeł OZE, ile jej zużywają) [17]. Są to obiekty o specjalnie dobieranych materiałach, z których są wykonane oraz posiadają specjalną architekturę, konstrukcję. Wszystko po to, aby ograniczyć do minimum straty ciepła i energii elektrycznej. To także budynki pasywne i niskoenergetyczne. Budownictwo takich obiektów nie jest w Polsce jeszcze wystarczająco rozpowszechnione. Jednak efekty w postaci niskich kosztów utrzymania wyrażonych w niskich rachunkach za ciepło i energię elektryczną, sprawiają, że znajdują coraz więcej zwolenników i użytkowników.

Klasa B to obiekty o wartości zintegrowanego wskaźnika charakterystyki energetycznej (EP) z przedziału od 0,26 do 0,50 w wypadku domów jednorodzinnych, ponadto zużywające od 63 do 157 kWh/(m<sup>2</sup>·rok) oraz domy wielorodzinne z wynikiem niższym, niż 141 kWh/(m<sup>2</sup>·rok). Klasa energetyczna B oznacza budynki energooszczędne, które są projektowane i budowane w obecnych czasach.

Obiekty klasy C charakteryzuje wartość zintegrowanego wskaźnika charakterystyki energetycznej (EP) z przedziału od 0,51 do 0,75, to oznacza, że zaliczamy do tej klasy domy jednorodzinne ze zużyciem na poziomie 157 - 250 kWh/(m<sup>2</sup>·rok), a w przypadku bloków nie więcej niż 223 kWh/(m<sup>2</sup>·rok). Takie budynki możemy nazwać średnio energooszczędnymi. Zalicza się do tej klasy obiekty o dobrej jakości energetycznej. Najczęściej przyjmują wartość mieszczącą się w tym przedziale domy jednorodzinne i wielorodzinne wznoszone po roku 1993. Wiele obecnych projektów domów jednorodzinnych mieści się w tej klasie energetycznej.

Do klasy energetycznej D zalicza się obiekty, dla których wartość zintegrowanego wskaźnika charakterystyki energetycznej (EP) zawiera się w przedziale od 0,76 do 1,00. W praktyce są to domy jednorodzinne zużywające od 250 do 344 kWh/(m<sup>2</sup>·rok) oraz domy wielorodzinne posiadające zużycie mniejsze, niż 305 kWh/(m<sup>2</sup>·rok). Takie obiekty możemy nazwać budynkami standardowymi. Klasie energetycznej D przyporządkowane są budynki odpowiadające aktualnym standardom.

Obiekty posiadające klasę E to budynki, dla których wartość zintegrowanego wskaźnika charakterystyki energetycznej (EP) jest równa wartości z przedziału od 1,01 do 1,25. Według nowej klasyfikacji oznacza to, że są to domy jednorodzinne, które potrzebują rocznie od 344 do 438 kWh/(m<sup>2</sup>·rok), oraz kamienice i bloki o zużyciu rocznym poniżej 387 kWh/(m<sup>2</sup>·rok). To budynki średnio energochłonne o średniej jakości energetycznej. Zwykle wskaźnik ten osiągają obiekty z wielkiej płyty i tradycyjne wznoszone po 1981 roku.

Klasę energetyczną F przypisuje się obiektom, dla których wartość zintegrowanego wskaźnika charakterystyki energetycznej (EP) jest równa wartości z przedziału od 1,26 do 1,50. Zaliczamy do tej kategorii energetycznej domy jednorodzinne ze zużyciem od 438 do 531 kWh/(m<sup>2</sup>·rok) oraz bloki z zapotrzebowaniem mniejszym niż 469 kWh/(m<sup>2</sup>·rok). To budynki energochłonne o słabej jakości energetycznej, w klasie tej mieszczą się zazwyczaj budynki wznoszone w latach 1970-1984.

Ostatnia klasa energetyczna G charakteryzuje obiekty, dla których wartość zintegrowanego wskaźnika charakterystyki energetycznej (EP) jest większa lub równa wartości 1,51. To najgorsze pod względem energetycznym obiekty, do których zaliczamy domy jednorodzinne zużywające ponad 531 kWh/(m<sup>2</sup>·rok) oraz bloki i kamienice o zużyciu energii powyżej 469 kWh/(m<sup>2</sup>·rok). Reasumując, są to budynki bardzo energochłonne o niedostatecznej jakości energetycznej. Zalicza się do nich budynki przedwojenne oraz znaczną większość obiektów budowanych do roku 1970 i nie poddawanych żadnym zabiegom termoizolacyjnym.

W przypadku budynków nowych można powiedzieć, że osiągają one standard budynku energooszczędnego (klasa B). Osiągnięcie tej klasy dla obiektów kilkunasto- lub kilkudziesięcioletnich jest dosyć trudne i kosztowne. W budynkach modernizowanych zapewnienie dobrego standardu w ramach aktualnych wymagań powinno być celem, do którego realizacji dążą zarówno właściciele jak i realizujący modernizację, remonty. Bardzo trudno osiągnąć status budynku energooszczędnego dla obiektów charakteryzujących się współczynnikiem  $E_p$  na poziomie powyżej 1,00 (klasy E, F i G). Nakład kosztów poniesionych na zmianę, remonty generalne i dostosowanie do wymagań dla klasy B jest najczęściej nieopłacalne ekonomicznie. Wartość wskaźnika EP nie pozwala na jednoznaczną ocenę ciepłochronności budynku, gdyż na jego wyznaczenie zasadniczy wpływ ma rodzaj wykorzystywanego źródła energii grzewczej. Oprócz tego bierze się pod uwagę wiele czynników zewnętrznych, jak i wewnętrznych, które rzutują na jego wartość.



Zwiększenie efektywności energetycznej obiektów jest związane z wdrażaniem rozwiązań mających na celu obniżenie zużycia energii elektrycznej i ciepła w budynku, przy jednoczesnym zachowaniu pełnej funkcjonalności oraz komfortu jego użytkowania. Efektywność energetyczna obiektów utożsamiana jest z szeregiem czynników, które mogą być realizowane na każdym etapie funkcjonowania obiektu. Czynnikiem determinującymi poprawę efektywności energetycznej obiektu są wszelkiego rodzaju przedsięwzięcia służące ograniczeniu zużycia zasobów energetycznych potrzebnych do prawidłowego funkcjonowania osób czy organizacji wykorzystujących budynek.

Na ocenę zapotrzebowania energetycznego przez budynek i wskaźnik EP wpływa bardzo wiele czynników, takich jak np.:

- **izolacja i jej jakość** – odnosi się to przede wszystkim do dachu, ścian zewnętrznych, okien – dzięki dobrym parametrom materiałów izolacyjnych znacznie zredukowane zostają straty ciepła [92], [109];
- **stosowany rodzaj systemu grzewczego** – rodzaj źródła ciepła oraz efektywne i nowoczesne urządzenia grzewcze wraz z całą instalacją mają istotny wpływ na dobry wynik klasy energetycznej budynku [19], [66];
- **wentylacja** – zminimalizowanie strat ciepła możliwe jest również przez właściwą wymianę i cyrkulację powietrza [6];
- **orientacja budynku** – ilość docierającego światła słonecznego również ma wpływ na zapotrzebowanie energetyczne nieruchomości, dobrze nasłonecznione budynki mogą je zmniejszyć o kilka procent [152], natomiast światło słoneczne będzie miało wpływ zarówno na parametry temperatury, jak i oświetlenia pomieszczeń;
- **wykorzystanie energii odnawialnej** – ostatnim aspektem, który pozytywnie wpływa na wynik dotyczący zapotrzebowania energetycznego to zastosowanie odnawialnych źródeł energii, jak np. panele fotowoltaiczne, kolektory słoneczne, pompy ciepła [49], [136].

Poprawa efektywności energetycznej obiektów jest obecnie uważana jako jeden z najistotniejszych czynników (uzasadnionych ekonomicznie), które są w stanie doprowadzić do ograniczenia zużycia energii w obiekcie [123]. Za poprawę efektywności energetycznej budynku, możemy także uważać stosowanie systemów energetyki odnawialnej.

Systemami OZE określamy układy generujące energię elektryczną oraz ciepło z odnawialnych źródeł energii.

Pomimo, że obiekt może posiadać takie samo zapotrzebowanie na energię jak przed zastosowaniem systemów OZE, to jednak dzięki tym instalacjom będzie zużywał mniej energii konwencjonalnej [81]. Budynki, których instalacje w całości pokrywają zapotrzebowanie na energię elektryczną i ciepło są określane jako nZEB (*Nearly Zero Energy Building*) [33]. Na tym poziomie efektywności energetycznej obiekt nie potrzebuje żadnej energii zewnętrznej do prawidłowego funkcjonowania. Jednocześnie nie emituje żadnych szkodliwych substancji, ponieważ całkowite zapotrzebowanie na energię elektryczną i ciepło jest pokrywane z systemów wykorzystujących energię słońca, wiatru, wody i ziemi [118].

Standard energetyczny obiektów jest bezpośrednio powiązany z poziomem efektywności energetycznej. W opisywanych zagadnieniach wprowadza się także pojęcie standardu energetycznego, który określa maksymalną dopuszczalną wielkość zużycia przez budynek energii pierwotnej, końcowej albo użytkowej, wyrażoną najczęściej w kWh/(m<sup>2</sup>·rok) [106].

Standard energetyczny może być narzucony przez przepisy prawne (np. Rozporządzenie Ministra właściwego ds. budownictwa w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie) lub zdefiniowany przez twórców danej technologii (np. standard budynku pasywnego). W marcu 2023 roku Parlament Europejski przyjął projekt nowelizujący dyrektywę 2018/844/UE, w której założono, że od 2028 roku wszystkie nowe budynki w Unii Europejskiej mają być zeroemisyjne. Budynki należące do władz publicznych lub przez nie wykorzystywane mają być zeroemisyjne już od 2026 roku.

Europejska norma ISO [144] określa wiele metod obliczeniowych zapotrzebowania na energię budynków do ich ogrzewania, chłodzenia, nawilżania i odwilżania powietrza wewnętrznego, obliczania bilansu energii i wyznaczania temperatury wewnętrznej w budynkach oraz wyznaczania zapotrzebowania na moc ogrzewania i chłodzenia. Pozwala to na wprowadzenie podziału poziomu energooszczędności w zależności od ilości energii potrzebnej do ogrzania 1 m<sup>2</sup> budynku w ciągu roku. Najważniejszym parametrem, wskaźnikiem pozwalającym na dokładną ocenę jest EU<sub>co</sub>. Określa on energię, która jest wykorzystywana na potrzeby ogrzewania, wentylacji oraz chłodzenia budynku. Inaczej mówiąc to energia użytkowa. Jest wykorzystywana bezpośrednio w domu, mieszkaniu lub lokalu użytkowym. Według tego wskaźnika wyróżnia się trzy podstawowe rodzaje budownictwa:

- budownictwo tradycyjne – powyżej 40 kWh/(m<sup>2</sup>·rok);
- budownictwo energooszczędne – od 15 kWh/(m<sup>2</sup>·rok) do 40 kWh/(m<sup>2</sup>·rok);
- budownictwo pasywne – poniżej 15 kWh/(m<sup>2</sup>·rok).

Stosując parametr  $EU_{co}$ , w celu dokładniejszego określenia standardu energetycznego budynków, możemy dokonać podziału obiektów na:

- budynki zeroemisyjne –  $EU_{co}$  0 kWh/(m<sup>2</sup>·rok);
- budynki pasywne –  $EU_{co}$  1-15 kWh/(m<sup>2</sup>·rok);
- budynki niskoenergetyczne –  $EU_{co}$  15 - 30 kWh/(m<sup>2</sup>·rok);
- budynki energooszczędne –  $EU_{co}$  30 - 70 kWh/(m<sup>2</sup>·rok);
- budynki poza klasą energetyczną –  $EU_{co}$  powyżej 70 kWh/(m<sup>2</sup>·rok).

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra właściwego do spraw budownictwa w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, standard WT 2022, wyróżniamy cztery standardy budynków energooszczędnych.

Budynek zeroenergetyczny zwany także energooszczędnym budynkiem zeroemisyjnym (ang. *Zero Emission Building*) – to budynek samowystarczalny pod względem energetycznym, dzięki doskonałej izolacyjności przegród zewnętrznych, odzyskowi ciepła z wentylacji i maksymalnemu wykorzystaniu zysków ciepła. Nie wymaga on dostarczania energii ze źródeł konwencjonalnych – ani do ogrzewania, ani do oświetlenia, ani do zasilania sprzętu AGD i innych urządzeń [16]. Zastosowane rozwiązania techniczne umożliwiają znaczne ograniczenie zużycia energii w porównaniu z typowym budynkiem. Zintegrowane z jego konstrukcją odnawialne źródła energii (moduły fotowoltaiczne, kolektory słoneczne, gruntowa pompa ciepła itp.) są w stanie pokryć niemal całkowicie zapotrzebowanie budynku na energię elektryczną oraz na cele grzewcze i bytowe [69]. Budynek zeroemisyjny równoważy emisję gazów cieplarnianych powstałych w procesie produkcji materiałów budowlanych, budowy, użytkowania, rozbiórki i utylizacji materiałów budowlanych poprzez produkcję wystarczającej ilości energii ze źródeł odnawialnych. Istnieje kilka określeń budynku zeroemisyjnego w zależności od tego, jaką część cyklu życia kompensujemy wyprodukowaną „zieloną” energią: od ZEB-O – gdzie bilansujemy emisję z eksploatacji budynku, poprzez ZEB-OM (bilans kompensacji emisji z wyprodukowania materiałów budowlanych i eksploatacji), aż do ZEB - complete – bilansujący emisję z całego cyklu życia budynku. Budynki zeroenergetyczne to nie tylko domy jedno lub wielorodzinne. Ten rodzaj obiektów dotyczy także budynków użyteczności publicznej, w tym obiektów edukacyjnych [132]. Dokonuje się także modernizacji istniejących budynków użyteczności publicznej w celu osiągnięcia standardu nZEB [114].

Budynek pasywny – to taki budynek, w którym zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania wynosi do 15 kWh/(m<sup>2</sup>·rok). Budynek pasywny jest obiektem bardzo dobrze izolowanym ( $U < 0,15$  W/(m<sup>2</sup>·K) odnośnie wszystkich nieprzezroczystych przegród

zewnątrznych oraz  $U < 0,80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  w przypadku okien i drzwi). Jest obiektem dostatecznie szczelnym pod względem izolacji termicznej z odpowiednią wentylacją i odzyskiem ciepła. Poza tym, taki budynek nie posiada mostków termicznych i maksymalnie wykorzystuje zyski słoneczne oraz ciepło powstające przy okazji działania oświetlenia, gotowania, pracy urządzeń elektrycznych i tego wydzielanego przez mieszkańców (tzw. ciepło bytowe). W budynkach pasywnych komfort termiczny zapewniony jest jedynie przez pasywne źródła ciepła, takie jak zyski od mieszkańców, urządzenia elektryczne, ciepło odzyskane w wyniku procesu wentylacji, dogrzewanie powietrza wentylującego budynek, rekuperację, energię słońca itp. [145]. Kluczowymi elementami projektu budynku pasywnego są przeszklenia, izolacja termiczna oraz odpowiednio zaprojektowana bryła domu i jego umiejscowienie na działce pod względem stron świata [94]. W domu wybudowanym w technologii pasywnej można praktycznie całkowicie zrezygnować z systemu centralnego ogrzewania. Grzejniki mogą pojawić się jedynie w pomieszczeniach, w których wymagana jest wyższa o kilka stopni temperatura, czyli np. w łazienkach. W pozostałych wnętrzach wystarczy dogrzewanie powietrza wentylacyjnego. Z uwagi na wymóg, który zakłada, że w budynkach pasywnych wskaźnik zapotrzebowania na energię pierwotną na wszystkie potrzeby nie powinien przekraczać  $120 \text{ kWh}/\text{m}^2$  rocznie, zaleca się stosowanie w tych obiektach efektywnego energetycznie oświetlenia oraz energooszczędnego sprzętu AGD, jak i pozostałych urządzeń.

Budynek niskoenergetyczny, niskoemisyjny (*Low Emission Building*) – przyjmuje się, że budynek niskoenergetyczny jest budynkiem o bardzo niskim zapotrzebowaniu na energię do ogrzewania wnętrza – od  $15$  do  $40 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$ . Tak niskie zapotrzebowanie jest uzyskiwane poprzez ponadstandardową izolację termiczną, bardzo dobrej jakości stolarkę, odpowiednie zabezpieczenie przed mostkami termicznymi i najczęściej rekuperację, czyli wentylację mechaniczną z odzyskiem ciepła [134]. Jak wnioskuje autorzy artykułu [26] przy klasyfikacji grupy energetycznej budynku, czyli tworzeniu jego charakterystyki energetycznej, należy uwzględniać rzeczywiste dane eksploatacyjne systemów energetycznych budynku.

Budynek energooszczędny – to przede wszystkim budynek, który jest tani w eksploatacji, w którym straty ciepła przez przegrody zewnętrzne ograniczone są do minimum oraz w którym maksymalnie zostało zredukowane zużycie energii na ogrzewanie, wentylację, oświetlenie i podgrzanie wody użytkowej. Obowiązujące rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (WT 2022) stawiają wymóg niskiego zużycia energii. Wskaźnik rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną EP dla domów jednorodzinnych nie może przekraczać  $70 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$ .

Określany jest taki obiekt, który w zakresie ograniczenia łącznej emisji gazów cieplarnianych emituje ich przynajmniej o 20% mniej, niż taki sam budynek, ale wykonany w technologiach uznanych za typowe. Duży wpływ na energooszczędność mają systemy HVAC (ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji), co sprawia, że zmianie powinno ulec dotychczasowe podejście do ich projektowania [7].

Wszystkie budynki, w których w danym okresie rozliczeniowym (6 miesięcy lub rok), sprzedaż energii do sieci dystrybucyjnej pokrywa się z jej zakupem, określamy jako budynki zeroenergetyczne netto. Jeśli w okresie bilansowym budynek generuje więcej energii, niż zużywa, to możemy powiedzieć o obiekcie, że jest plus energetycznym.

### 2.1.3. Aspekty prawne

Problematyka efektywności energetycznej znajduje się w centrum zainteresowania Unii Europejskiej, czego efektem jest publikowanie dyrektyw, które dla krajów członkowskich są podstawą opracowania ustaw i rozporządzeń w zakresie efektywności energetycznej. Wyzwania związane z globalizacją, wobec których stanęła Unia Europejska, skłoniły ją do podjęcia programu reform społecznych i gospodarczych. Jedną z pierwszych ważniejszych unijnych regulacji w obszarze odnawialnych źródeł energii ma swój początek w roku 1997. Wówczas Komisja Europejska przyjęła dokument, tzw. Białą Księgę Komisji Europejskiej „Energia dla przyszłości - odnawialne źródła energii”. Taki tytuł nadała Komisja Europejska Białej Księdze przyjętej 11 listopada 1997 r. [150]. Dokument ten powstał dla podkreślenia konieczności zwiększenia udziału energii odnawialnej w bilansie paliwowo-energetycznym Unii Europejskiej. Miała wskazywać możliwości i narzędzia dla osiągnięcia celu minimum - podwojenia do 2010 roku udziału odnawialnych źródeł energii w ogólnej konsumpcji paliw i energii w krajach członkowskich. Najważniejsze postulaty zawarte w Białej Księdze:

- wzrost bezpieczeństwa energetycznego (szacuje się, że import paliw i energii stanowi obecnie w Unii Europejskiej 50% całkowitego zapotrzebowania energetycznego, a docelowo zakłada wzrost do 70%, jeśli zachowany będzie obecny model rozwoju i dotychczasowe sposoby zaopatrzenia w paliwa i energię);
- promocję regionalnego rozwoju gospodarczego;
- korzyści ekologiczne zdefiniowane w piątym planie działań na rzecz ochrony środowiska;
- tworzenie nowych miejsc pracy, zwłaszcza w małych i średnich przedsiębiorstwach;
- modułowy charakter technologii w energetyce odnawialnej, dzięki czemu instalacje są łatwe do finansowania.

Wyznaczone kierunki rozwoju energetyki odnawialnej napotykały szereg przeszkód, które utrudniały realizację założeń i postulatów zawartych w Białej Księdze [147]. Do barier ograniczających wykorzystanie energii odnawialnej zalicza się:

- silną infrastrukturę techniczną, organizacyjną i instytucjonalną zaopatrzenia w energię konwencjonalną, która blokuje wykorzystanie odnawialnych źródeł energii;
- determinację niewłaściwego kierunku rozwoju opartego na paliwach kopalnych [79];
- operowanie nierzeczywistymi cenami konwencjonalnych paliw i energii (pomijanie kosztów zewnętrznych, w tym ekologicznych) oraz subsydiowanie wydobycia i dystrybucji paliw kopalnych oraz produkowanej z nich energii [70];
- brak polityki energetycznej stymulującej szybki rozwój wykorzystania odnawialnych źródeł energii [149];
- wyższe początkowe koszty inwestycji w technologie wykorzystujące odnawialne źródła energii oraz dłuższy okres zwrotu nakładów (przy niskich lub zerowych później nakładach eksploatacyjnych), niż w energetyce konwencjonalnej [35];
- niedostateczna podaż technologii i urządzeń;
- brak odpowiedniej świadomości u potencjalnych inwestorów wynikającej z braku wiedzy, informacji i zaufania do nowych rozwiązań [131].

W 2010 roku cele zostały zrewidowane i odzwierciedlone w nowej strategii rozwoju gospodarczego Unii Europejskiej na najbliższe 10 lat, która nosiła nazwę „20-20-20” i miała na celu poprawę efektywności energetycznej oraz dekarbonizację europejskiego sektora energetycznego [62]. W dokumencie wskazano następujące główne cele:

- zwiększenie do 2020 r. udziału OZE w całkowitym zużyciu energii do 20% (cel wiążący);
- zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych o 20% w stosunku do poziomów z 1990 r.;
- zwiększenie efektywności energetycznej o 20% oraz zwiększenie wykorzystania biopaliw w transporcie do co najmniej 10% (cel wiążący) [77].

Za kluczowe korzyści wynikające z wykorzystania energii odnawialnej uważa się wykorzystanie czystej, odnawialnej energii, korzystny wpływ na środowisko naturalne poprzez brak emisji do atmosfery szkodliwych substancji w tym CO<sub>2</sub> w procesie wytwarzania energii oraz brak konieczności wydobycia i zużywania paliw kopalnych.

Jednym z pierwszych dokumentów dotyczących efektywności energetycznej jest Dyrektywa 2006/32/UE, nazywana ESD (ang. *EU Directive on Energy End-Use Efficiency and Energy Services*) [37]. Uchyliła ona wcześniejszą dyrektywę 2004/8/UE. Celem dyrektywy

z 2006 roku było osiągnięcie w latach 2008-2016, krajowego celu indykatywnego w zakresie oszczędności energii na poziomie 9%. Oznaczało to także dla Polski konieczność osiągnięcia oszczędności na poziomie 9% energii pierwotnej w 2016 roku, czyli o 1% w każdym roku jej obowiązywania. Jednak głównym dokumentem w obszarze efektywności energetycznej stała się Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/27/UE z dnia 25 października 2012 r. [38]. Jednakże najważniejszym celem dyrektywy 2012/27/UE stało się ograniczenie, w latach 2010-2020, krajowego zużycia energii pierwotnej o 13,6 Mtoe i uzyskanie zużycia energii pierwotnej na poziomie 96,4 Mtoe. Natomiast zużycie energii finalnej w roku 2020 powinno być na poziomie 71,6 Mtoe. Kolejnym celem dyrektywy jest zmniejszenie, do roku 2020, zużycia energii pierwotnej o 20% oraz położenie podstaw do dalszej poprawy efektywności energetycznej po tym terminie. W ramach wspomnianej dyrektywy każde państwo członkowskie ma obowiązek wprowadzenia działań do oszczędności energii, ukierunkowanych na obniżenie zużycia energii końcowej o 1,5% rocznie. Drugim ważnym, obowiązującym dokumentem w zakresie efektywności energetycznej jest norma PN-EN 15193 „Charakterystyka energetyczna budynków – Wymagania energetyczne dotyczące oświetlenia” (tabela 2.1). Dokument ten jest szczególnie istotny w kontekście niniejszej rozprawy, ponieważ dotyczy on zagadnień związanych z efektywnością energetyczną w odniesieniu do instalacji oświetleniowych. Aktualnie obowiązująca norma z roku 2017 występuje w wersji angielskiej i zastąpiła poprzednią wersję z 2010 roku. Zmiany polegały przede wszystkim na znacznie dokładniejszym określeniu wpływu dostępności światła dziennego i sterowania oświetleniem na zmniejszenie zużycia energii.

Podstawowym aktem prawnym w Polsce w obszarze efektywności energetycznej stała się Ustawa o efektywności energetycznej z 20 maja 2016 roku [141]. Dokument ten implementuje na grunt krajowy, wspomnianą wcześniej dyrektywę unijną 2012/27/UE. Ten obowiązujący akt prawny jest trzecią wersją ustawy o efektywności energetycznej. Pierwsza została uchwalona w 2011 roku, a następnie w znacznym stopniu znowelizowana w roku 2015. Ustawa z 2016 roku w sposób szczególny uwzględnia:

- zasady realizacji obowiązku uzyskania oszczędności energii;
- zadania jednostek sektora publicznego w zakresie poprawy efektywności energetycznej;
- regulacje związane z przeprowadzeniem audytu energetycznego przez przedsiębiorstwa;

- zasady opracowania krajowego planu działań dotyczącego efektywności energetycznej.

Ustawa o efektywności energetycznej (Ustawa EE) jest ważnym dokumentem, który wprowadza rozwiązania systemowe umożliwiające zwiększenie efektywności wytwarzania, dostarczania paliw i energii. Dokument określa także rozwiązania przydatne dla odbiorców końcowych, które mają prowadzić do zwiększenia efektywności wykorzystania energii. Ustawa odnosi się do podstawowych nośników energii, tj. energii elektrycznej, ciepła i gazu ziemnego. Skierowana jest zarówno do przedsiębiorstw energetycznych, jak i do odbiorców końcowych, w tym jednostek sektora publicznego. W myśl postanowień zawartych w ustawie, każde przedsiębiorstwo jest zobowiązane do realizacji w swojej organizacji, określonych przedsięwzięć mających zmierzać do poprawy efektywności energetycznej u odbiorcy końcowego. Efektem wprowadzenia tych działań ma być uzyskanie oszczędności w zużyciu energii finalnej w wysokości określonej w ustawie. Wielkość oszczędności została określona na poziomie 1,5% w skali roku i wyrażana jest w Mtoe (tony oleju ekwiwalentnego). Wielkość uzyskanej oszczędności odnosi się do energii elektrycznej, ciepła i gazu ziemnego, które w danym roku zostały sprzedane odbiorcy końcowemu przyłączonemu do sieci. Wartość ta jest pomniejszona o ilość zaoszczędzonej energii przez odbiorców końcowych. Ustawa EE określa m.in. mechanizm wsparcia efektywności energetycznej, który opiera się na tzw. Białych Certyfikatach. Certyfikaty te są to świadectwa efektywności energetycznej, które opierają się na systemie zbywalnych praw majątkowych. W ustawie przyjęto założenie, że świadectwa efektywności energetycznej są przyznawane przede wszystkim za te działania, które dają najwyższy wskaźnik ekonomiczny.

Kolejnym dokumentem legislacyjnym odnoszącym się do efektywności energetycznej i dotyczącym oświetlenia jest polska norma z 2012 PN-EN-12464-1 „Światło i oświetlenie” [100]. Po dekadzie obowiązywania została zastąpiona w 2022 roku przez nową normę, dostępną także w wersji polskiej [97]. W dokumencie określono wymagania oświetleniowe dla osób na stanowiskach pracy w pomieszczeniach, które spełniają potrzeby związane z komfortem i wydolnością widzenia osób o normalnej lub skorygowanej do normalnej okulistycznej zdolności widzenia. Norma „Światło i oświetlenie” zaleca taki sposób projektowania oświetlenia, aby wymagania oświetleniowe dla danego zadania lub przestrzeni były spełnione w sposób efektywny energetycznie. Wskazuje na możliwość uzyskiwania oszczędności energii poprzez wykorzystanie potencjału światła dziennego, reagowania na zachowania użytkowników oświetlenia, doskonalenie charakterystyk utrzymania instalacji oświetleniowej,



a także wykorzystywanie w pełni systemów sterowania światłem. W opisywanej normie zawarto także zalecenia dotyczące dobrej praktyki oświetleniowej, w tym potrzeb wzrokowych i pozawzrokowych (niezwiązanych z rejestracją obrazu w siatkówce oka).

Warto wspomnieć, że w 1971 roku została opublikowana norma dotycząca oświetlenia wewnątrz światłem dziennym [96]. Regulacja obowiązywała do 2005 roku i nie została zastąpiona inną, nowszą normą. Należy zwrócić uwagę na fakt, że norm dotyczących oświetlenia jest bardzo dużo. W tabeli 2.1 wymieniono przykładowe normy oświetleniowe, z których można próbować implementować rozwiązania mające na celu poprawę efektywności energetycznej budynków. Normy oświetleniowe zawierają zarówno wytyczne dotyczące parametrów oświetlenia, jak i związane z układami i systemami sterowania oświetleniem w obiektach. Wymieniona jako pierwsza, norma PN-EN 15193, w sposób precyzyjny określa parametry dotyczące wykorzystania światła dziennego, definiuje sposoby obliczania zużycia energii w instalacjach oświetleniowych oraz uwzględnia zastosowanie systemów i urządzeń automatyki budynkowej do określania oszczędności w zużyciu energii elektrycznej.

Wymagania i wytyczne dotyczące efektywności energetycznej ciągle się zmieniają, a kierunek zmian jest proekologiczny. Najnowsze normy, rozporządzenia i dyrektywy traktują zagadnienie efektywności energetycznej w sposób priorytetowy. Najnowsza Dyrektywa (UE) 2023/1791 w sprawie efektywności energetycznej ustanawia zasadę „efektywność energetyczna przede wszystkim” jako podstawę polityki energetycznej Unii Europejskiej. Zobowiązuje ona m.in. kraje członkowskie do osiągnięcia w latach 2021 - 2030 skumulowanych oszczędności końcowego zużycia energii, które są równoważne nowym oszczędnościom w skali roku w wysokości co najmniej:

- 0,8% rocznego zużycia energii końcowej w latach 2021 - 2023;
- 1,3% w latach 2024 - 2025;
- 1,5% w latach 2026 - 2027;
- 1,9% w latach 2028 - 2030.

W dokumencie ustanowiono także roczny cel zmniejszenia zużycia energii na poziomie 1,9% dla całego sektora publicznego, a roczny obowiązek poddawania renowacji 3% budynków rozszerzono na wszystkie szczeble administracji publicznej.

Tabela 2.1. Wykaz wybranych norm dotyczących oświetlenia i jego sterowania

Źródło: [Opracowanie własne na podstawie [99]]

Lp.	Oznaczenie normy	Nazwa normy	Obowiązująca wersja
1.	PN-EN 15193	Efektywność energetyczna budynków – Wymagania energetyczne dotyczące oświetlenia	PN-EN 15193-1+A1:2021-09 (EN)
2.	PN-E-02033:1968 (PL)	Oświetlenie wewnątrz światłem elektrycznym	PN-EN 12464-1:2022-01 (EN)
3.	PN-EN 12464-1:2012 (PL)	Światło i oświetlenie – Oświetlenie miejsc pracy – Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach	PN-EN 12464-1:2022-01 (PL)
4.	PN-EN 12665:2003 (DE)	Światło i oświetlenie – Podstawowe terminy oraz kryteria określania wymagań dotyczących oświetlenia	PN-EN 12665:2018 (PL)
5.	PN-EN 15251:2007 (EN)	Kryteria środowiska wewnętrznego, obejmujące warunki cieplne, jakość powietrza wewnętrznego, oświetlenie i hałas	PN-EN 16798-1:2019-06 (EN)
6.	PN-EN 62386-101:2009 (EN)	Cyfrowy system sterowania oświetleniem (DALI) – Część 101: Wymagania ogólne – komponenty systemu	PN-EN 62386-101:2015-06 (EN)
7.	PN-EN 62386-101:2015-06/A1:2018-11 (EN)	Cyfrowy system sterowania oświetleniem – Część 101: Wymagania ogólne – Komponenty systemu	PN-EN IEC 62386-101:2023-08 (EN)
8.	PN-EN 62386-103:2015-06 (EN)	Cyfrowy system sterowania oświetleniem – Część 103: Wymagania ogólne – Urządzenia sterujące	PN-EN IEC 62386-103:2023-08 (EN)
9.	PN-EN 62386-207:2009 (EN)	Cyfrowy system sterowania oświetleniem (DALI) – Część 207: Wymagania szczegółowe dotyczące urządzeń do lamp; moduły LED	PN-EN IEC 62386-207:2018-10 (EN)
10.	PN-EN IEC 62386-218:2018-09 (EN)	Cyfrowy system sterowania oświetleniem – Część 218: Wymagania szczegółowe dotyczące urządzeń sterujących – Wybór krzywej ściemniania	PN-EN IEC 62386-218:2018-09 (EN)
11.	PN-EN 62386-304:2017-12 (EN)	Cyfrowy system sterowania oświetleniem – Część 304: Wymagania szczegółowe – Urządzenia wejściowe – Czujniki światła	PN-EN 62386-304:2017-12 - (EN)
12.	PN-EN 62386-303:2017-12 - (EN)	Cyfrowy system sterowania oświetleniem – Część 303: Wymagania szczegółowe – Urządzenia wejściowe – Czujniki zajętości pomieszczenia	PN-EN 62386-303:2017-12 - (EN)

#### **2.1.4. Czynniki wpływające na efektywność energetyczną obiektów**

Zwiększenie efektywności energetycznej obiektów jest rozumiane jako wprowadzenie rozwiązań i działań w wyniku, których zostaną osiągnięte oszczędności w zużyciu energii elektrycznej i ciepła w obiekcie [24]. Generalnie działania związane z poprawą efektywności energetycznej w budynkach można podzielić na dwa obszary. Pierwszy dotyczy oszczędności w zużyciu energii elektrycznej, drugi związany jest z ciepłem. Niniejsza rozprawa dotyczy zwiększenia efektywności energetycznej w instalacjach oświetleniowych, więc aspekty dotyczące zmniejszenia zużycia ciepła nie będą szeroko omawiane. Należy pamiętać, że istnieje bezpośredni związek z dostępnością światła dziennego do pomieszczeń, a temperaturą. Duża ilość docierającego promieniowania słonecznego do pomieszczenia, wiąże się ze wzrostem w nim temperatury. Zwiększenie temperatury w pomieszczeniu wywołane promieniowaniem słonecznym, może skutkować koniecznością zastosowania urządzeń klimatyzacyjnych w okresie letnim, a w okresie zimowym, ograniczyć wykorzystanie ciepła z grzejników. Zdecydowanie prościej oraz efektywniej jest ograniczać i regulować ilością promieniowania słonecznego trafiającego do wnętrza pomieszczeń. W ten sposób można oszczędniej wpływać na temperaturę, niż stosować urządzenia chłodzące, które zużywają energię elektryczną. Najważniejsze, aby odpowiednio regulować dostępem światła dziennego, w sposób zapewniający wymagane natężenie oświetlenia i jednocześnie nie przekraczać wartości dopuszczalnej, ustalonej temperatury w pomieszczeniach. Do podstawowych czynników mających wpływ na zużycie energii w budynku zaliczamy:

- lokalizację obiektu w odniesieniu do strefy klimatycznej;
- położenie bryły obiektu względem stron świata – rozmieszczenie pomieszczeń;
- konstrukcję i architekturę budynku – geometria budynku;
- rodzaj otoczenia – zabudowa urbanistyczna, elementy architektury krajobrazu;
- rodzaj materiałów budowlanych z jakich powstał, izolacyjność przegród budowlanych;
- rodzaj zastosowanej wentylacji;
- właściwy dobór instalacji grzewczej i chłodzącej (klimatyzacji);
- charakter i sposób użytkowania budynku;
- dodatkowe urządzenia w budynku, np. emitujące ciepło;
- zastosowane systemy zarządzania energią i budynkiem.

### Lokalizacja obiektu w odniesieniu do strefy klimatycznej

Badań naukowych dotyczących bezpośredniego wpływu otoczenia budynku na zużycie energii elektrycznej i ciepła jest niewiele. Położenie obiektu ze względu na długość i szerokość geograficzną ma bardzo istotny wpływ na zapotrzebowanie energetyczne budynku [36]. Badania przeprowadzone przez naukowców wykazały, że dotyczy to zarówno obiektów położonych w chłodniejszych, jak i cieplejszych strefach. W zakresie zużycia energii elektrycznej dotyczy to przede wszystkim instalacji oświetleniowych. Największym wyzwaniem dla projektantów jest wykonanie takich projektów budynków, które pozwolą zmaksymalizować korzystny wpływ cieniowania latem, przy jednoczesnym minimalizowaniu jego niekorzystnego wpływu w zimie. Naukowcy z Uniwersytetu Tsinghua przebadali obiekty w czterech typowych klimatach w Chinach [55]. Maksymalne różnice w potencjale oszczędzania energii związanym między poszczególnymi lokalizacjami wyniosły odpowiednio 20%, 31%, 43% i 49%.

### Konstrukcja i architektura budynku

Określenie parametrów budynku, które mają istotny wpływ na charakterystykę energetyczną, jest ważnym krokiem umożliwiającym zmniejszenie obciążeń cieplnych i chłodniczych budynków na etapie projektowania. Wdrażanie pasywnych technik projektowania dla tych budynków nie jest prostym zadaniem zwłaszcza w gęstej zabudowie miejskiej [82]. Charakterystyka energetyczna budynków zależy od wielu parametrów budynku, takich jak rozmiar okien, wysokość pomieszczeń i właściwości materiałów, z których budynek jest wykonany. W obiektach użyteczności publicznej, w niektórych przypadkach, stosuje się także szklane ściany osłonowe, które również mają wpływ na zużycie energii i ciepła w budynku [148].

### Orientacja obiektu względem stron świata

Orientacja budynku względem stron świata wpływa na czas nasłonecznienia wnętrza, a co za tym idzie na poziom zysków słonecznych i zużycie energii końcowej na ogrzewanie oraz oświetlenie [120]. Istotnym elementem jest odpowiednie rozmieszczenie okien odpowiedniej wielkości oraz ich prawidłowy montaż. Przyjęte rozwiązania projektowe w zakresie doboru właściwych rodzajów okien w budynkach energooszczędnych powinny być poprzedzone i zweryfikowane odpowiednimi analizami energetycznymi, które można wykonać przy użyciu popularnych programów architektonicznych [71]. Natomiast autorzy badań [143] posługując się programami do modelowania i symulacji wykazują, że kształt budynku wpływa na

obciążenie termiczne. Jak wykazują badania i analizy, właściwa orientacja budynku względem stron świata w znaczący sposób wpływa na zmniejszenie zużycia energii na oświetlenie i obciążenie grzewcze obiektu.

#### Rodzaj otoczenia - zabudowa urbanistyczna, elementy architektury krajobrazu

Wpływ bezpośredniego otoczenia na zużycie energii elektrycznej i ciepła w obiekcie, dotyczy w największym stopniu zabudowy miejskiej. Istotny jest dostęp promieniowania słonecznego, które przekłada się na wartość temperatury w pomieszczeniach. Nie mniejsze znaczenie ma oddziaływanie wiatru oraz innych czynników zewnętrznych [46], [67]. Często są także przypadki, w których zarówno sąsiednia zabudowa, jak i np. rosnące drzewa, ograniczają dostęp światła słonecznego do pomieszczeń w budynku [113].

#### Rodzaj materiałów budowlanych użytych do budowy oraz termoizolacja ścian

Rodzaj ścian zewnętrznych, a co za tym idzie ich parametry termiczne mają istotne znaczenie dla zużycia ciepła w obiekcie w okresie zimowym oraz energii elektrycznej na chłodzenie w okresie letnim. Od parametrów, właściwości materiałów, z których wykonane są m.in. ściany zewnętrzne obiektu, zależy charakterystyka energetyczna budynku. Parametry te są zależne od właściwości materiałów i niezależne od kształtu i typu budynku [50]. Badania naukowców wykazują, że oprócz wykonania właściwej termoizolacji ścian, warto także zadbać o sprawną i wydajną instalację CWU i CO w budynku [86], [107], [109].

#### Rodzaj zastosowanej wentylacji

Wymiana powietrza w budynku wiąże się ze znacznym zużyciem energii, która jest niezbędna do zasilania wentylatorów, a także do podgrzania powietrza wymienianego. Szczególne znaczenie ma to w okresie zimowym. Ilość energii zużywanej do podgrzania powietrza doprowadzanego z zewnątrz może stanowić niemal połowę zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynku. Komfort termiczny najskuteczniej zapewnia wentylacja mechaniczna, ale wentylacja hybrydowa jest wyraźnie lepsza od wentylacji grawitacyjnej, dzięki czemu często jest rozwiązaniem konkurencyjnym. Systemy wentylacji mechanicznej pozwalają na regulowanie intensywności wentylacji w zależności od potrzeb [54]. Istotne jest także odzyskiwanie ciepła z powietrza usuwanego z budynku (rekuperacja).

#### Właściwy dobór instalacji grzewczej i chłodzącej (klimatyzacji)

Obecnie w sektorze mieszkalnym jako najbardziej popularny i szeroko stosowany jest system ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji oparty na kontroli nad wybranymi strefami.

Nie może to zagwarantować komfortu termicznego w każdym pomieszczeniu budynku. Dzięki odpowiednio zaprojektowanemu systemowi sterowania kontroli ciepła i chłodu można dostosować system pracy instalacji tak, aby zapewnić wymagane parametry cieplne w każdej strefie. Realizowane jest to poprzez monitorowanie temperatury powietrza zgodnie z preferencjami użytkowników, zapewniającymi komfort cieplny w każdej strefie [47]. Ośrodki naukowo-badawcze prowadzą analizy porównawcze końcowego zapotrzebowania na energię pierwotną, zapotrzebowanie na energię pierwotną nieodnawialną, emisje CO<sub>2</sub>. Otrzymane wyniki wskazują jednoznacznie, że zarówno systemy ogrzewania, jak i chłodzenia budynku mają istotny wpływ na stopień efektywności energetycznej. Uwzględniając analizy ekonomiczne i środowiskowe, naukowcy rekomendują odpowiednie rozwiązania systemów ogrzewania i przygotowania ciepłej wody, umożliwiając zaprojektowanie i budowę budynków bez negatywnego wpływu na środowisko [5].

#### Charakter i sposób użytkowania budynku

Aspekt wpływu użytkowania budynku na poprawę efektywności energetycznej będzie miał duże znaczenie w przypadku dużych obiektów biurowych i budynków użyteczności publicznej. W tych obiektach występuje duża ilość użytkowników, którzy nie przywiązują większej wagi do zużycia energii elektrycznej i ciepła. Autor potwierdził ten fakt na podstawie obserwacji poczynionych podczas realizacji badań do niniejszej rozprawy. Jak wykazano w artykule [137] zachowanie użytkowników ma duży wpływ na zapotrzebowanie, zarządzanie i zużycie energii w budynku. Najskuteczniejszą metodą mogącą mieć realny wpływ na obniżenie zużycia mediów jest oprócz systemów automatycznej kontroli i sterowania, wprowadzenie systemu zarządzania energią [39]. Zachowania użytkowników są jedną z głównych przyczyn różnic pomiędzy symulacjami, a rzeczywistym zużyciem energii w obiektach. Jednym ze sposobów pozwalających ograniczyć zużycie energii i wspomagać użytkowników w procesie sterowania i regulacji instalacją oświetleniową jest zastosowanie systemów automatyki i sterowania budynkami (BACS) [20].

#### Dodatkowe urządzenia w budynku

Do urządzeń dodatkowych, najczęściej stosowanych w celu poprawy efektywności energetycznej budynku należą urządzenia i systemy grzewcze. Popularność stosowania takich rozwiązań wynika z możliwości uzyskania dużych oszczędności. Istnieją zaawansowane urządzenia i instalacje pozwalające, np. na pozyskiwanie energii i odzysk ciepła ze ścieków [83]. Najczęściej jednak stosowanymi rozwiązaniami wprowadzającymi dodatkowe urządzenia

do obiektu są instalacje wykorzystujące odnawialne źródła energii OZE. W ostatnich latach odnotowuje się znaczny przyrost mikroinstalacji OZE, głównie systemów fotowoltaicznych i powietrznych pomp ciepła. Zwiększenie efektywności wykorzystania tych źródeł można uzyskać poprzez tworzenie klastrów energetycznych, w których zarządzanie energią odgrywa istotną rolę w poprawie efektywności energetycznej budynków należących do takich klastrów energii [115].

### **2.1.5. Sposoby poprawy efektywności energetycznej obiektów**

Działania ograniczające zużycie energii elektrycznej i ciepła w obiektach są realizowane od dawna. Budynki w Unii Europejskiej odpowiadają za 40% zapotrzebowania na energię pierwotną. Każdemu użytkownikowi zależy na jak najmniejszych opłatach za zużytą energię. Pierwszym krokiem do poprawy efektywności energetycznej obiektów, w tym użyteczności publicznej, jest identyfikacja źródeł nieefektywności [31].

Obecnie obiekty użyteczności publicznej mają powierzchnię sięgającą nawet kilku tysięcy metrów kwadratowych. Codzienny proces decyzyjny dla zarządzających obiektami użyteczności publicznej jest pełen różnorodnych wyzwań, takich jak potrzeby konserwacyjne (zapobiegawcze i naprawcze), ograniczone budżety na inwestycje i naprawy, ograniczone ramy czasowe do podejmowania decyzji, a także konieczność wprowadzania jak największych oszczędności w zużyciu energii [132]. Istotnym elementem pozwalającym na poprawę efektywności energetycznej jest odpowiednie zarządzanie odbiornikami ciepła i energii elektrycznej. W związku z tym konieczne jest przeprowadzenie audytu energetycznego budynku, który pozwala ustalić miejsca charakteryzujące się najgorszymi parametrami energetycznymi i podjąć stosowne działania na poziomie zarządzania, które będą prowadzić do zmniejszenia zużycia energii w obiekcie.

Elementem, który negatywnie wpływa na podejmowane decyzje w zakresie wdrożenia odpowiednich odbiorników ciepła i energii elektrycznej są procedury takie jak przetargi, zamówienia publiczne [146]. Procedury te często ograniczają racjonalny wybór urzędów i rozwiązań, które są efektywne energetycznie, ponieważ bardzo często za jedyne, najważniejsze kryterium wyboru oferenta przyjmuje się najniższą cenę [45]. Istnieją jednak sposoby pozwalające ograniczyć negatywny wpływ wymienionych powyżej czynników poprzez:

- umożliwienie systemom zamówień publicznych zapytań o zielone, ekologiczne rozwiązania oparte na energooszczędnych układach;

- zmiana domyślnych ustawień w systemach i urządzeniach mechanicznych oraz układach sterujących energochłonnymi urządzeniami w budynku.

Dzięki możliwości wyboru i dokonywania korzystnych zmian w funkcjonowaniu urządzeń i systemów energetycznych można uzyskać wymierne korzyści. Przy czym wskazane działania nie wymagają nowych rozporządzeń ani przepisów i w efekcie przyczynią się do redukcji zużycia energii w obiektach użyteczności publicznej.

Jednym ze skutecznych i często stosowanych rozwiązań wspomagających zarządzanie energią w budynku jest implementacja systemu jej pomiaru [138]. Wykorzystanie platformy monitorowania i sterowania systemami energetycznymi, w tym wizualizacji (np. systemy SCADA) [42], mogą przynosić wymierne korzyści związane np. z ustaleniem pogorszenia sprawności wybranych grup odbiorników i okresowymi zmianami przepływów energii [91].

Analiza zużycia energii z podziałem na grupy odbiorników, części obiektu, użytkowników w budynkach użyteczności publicznej pozwala osobom decyzyjnym identyfikować problemy, ustalać priorytety i wdrażać nowe rozwiązania pozwalające poprawiać ogólną wydajność energetyczną. Przykład korzyści związanych z podzieleniem całkowitego zużycia energii elektrycznej na poszczególnych użytkowników i niezależnym monitorowaniem każdego z nich, przedstawiono w pracy [32]. Wskazane w nim rozwiązanie uwzględnia zmienność dynamiki energetycznej budynku i zapewnia wsparcie zarządcom budynków we wdrażaniu planów oszczędności. W artykule [21] przeanalizowano efekt wdrożenia strategii sterowania opartego na metodach sztucznej inteligencji, w budynku biurowym charakteryzującym się zintegrowanymi systemami energetycznymi z technologiami wytwarzania i magazynowania energii zlokalizowanymi w tym obiekcie. Celem zaproponowanego układu sterowania było zminimalizowanie kosztów operacyjnych. Do realizacji zaspokojenia zapotrzebowania na chłodzenie wykorzystano magazynowanie energii cieplnej i system akumulatorów. Z otrzymanych wyników wywnioskowano, że proponowana strategia kontroli systemowej prowadzi do zmniejszenia kosztów w zakresie od 39,5% do 84,3% dla różnych konfiguracji.

Najbardziej kompleksowym sposobem ustalenia struktury odbiorników ciepła i energii elektrycznej, prowadzącym do poprawy efektywności energetycznej jest kompleksowa synteza struktury obiektów i odbiorników energii wykorzystująca metody optymalizacji. Szczegółowo ten proces został opisany przez zespół autorów w pracy [12]. Uzyskanie najwyższych efektywności energetycznych wymaga stosowania metod kompleksowej analizy systemów budynku i znajdujących się w nim instalacji, z zastosowaniem metod optymalizacji. Do jej przeprowadzenia wymagane jest opracowanie modelu obiektu (wraz z instalacjami



elektrycznymi i cieplnymi) oraz aplikacji pozwalającej na prowadzenie symulacji jego pracy i ustalenie wskaźników efektywności energetycznej. Negatywną stroną takiego podejścia jest czas obliczeń, szczególnie w przypadku dużych obiektów, takich jak obiekty biurowe i sportowe. Bardzo rzadko jednak mamy do czynienia z możliwością optymalizacji jednocześnie budynku (struktura, materiały) i instalacji. W związku z tym często zadanie optymalizacji sprowadza się do procesów optymalizacji zarządzaniem przepływami energii w istniejących obiektach [93]. Podejmowane znaczące wysiłki badawcze w kierunku optymalizacji (minimalizacji) zużycia energii, koncentrują się na opracowaniach symulacyjnych z użyciem różnych programów i narzędzi dostosowanych do wielkości i charakteru użytkowania danego obiektu. Takie działania pozwalają zidentyfikować odpowiednią klasę aplikacji, która wymaga dużej mocy obliczeniowej i przeprowadzenie symulacji w możliwie krótkim czasie. Problem staje się coraz bardziej złożony przy przeprowadzaniu takich symulacji przepływu energii w dużych budynkach (obiekty biurowe, hale sportowe, widowiskowe), w których generowanie optymalnych wartości zadanych może być nieefektywne w czasie. Modułowe systemy optymalizacji mogą być skutecznie wykorzystywane w tych procesach zarządzania energią, w celu osiągnięcia szeregu celów związanych ze zwiększeniem efektywności energetycznej [78]. Jednym ze skutecznych i efektywnych rozwiązań związanych z zarządzaniem energią w budynku jest stworzenie skutecznego systemu pomiaru jej zużycia [52]. Stworzenie platformy zarządzania energią w celu monitorowania i kontrolowania zapotrzebowania energetycznego obiektu przynosi wymierne korzyści. Wraz ze wzrostem informacji o przepływach energii odpowiednio rośnie liczba liczników, ilość danych i złożoność zarządzania dużą ilością danych. Osiągnięcie całkowitej przejrzystości ilości zużywanej energii w zakładzie produkcyjnym pozwala kierownictwu dokładnie identyfikować, ustalać priorytety i rejestrować nowe możliwości poprawy ogólnej wydajności energetycznej. Opracowanie i zastosowanie wskaźników zużycia energii pozwala na ciągłe monitorowanie wydajności energetycznej.

W wypadku budynków mieszkalnych w obszarze związanym z oszczędnością zużycia ciepła, najczęściej wprowadzanymi działaniami jest termoizolacja ścian, dachu, likwidacja mostków termicznych oraz wymiana stolarki okiennej i drzwiowej [72]. Wymierne oszczędności, które można uzyskać poprzez odpowiednie działania w zakresie ograniczenia zużycia ciepła [61]. W dalszej kolejności istotną poprawę uzyskać można poprzez wymianę źródła ciepła na inne o wyższej sprawności [75]. Wyniki badań przeprowadzonych przez belgijskich naukowców dowodzą, że im lepiej budynek jest ocieplony, tym większy jest wpływ

stylu życia na obciążenia grzewcze. Jedną z ważnych strategii ograniczania zużycia ciepła w całym cyklu życia budynku jest dostosowanie wielkości domu i charakterystyki jego użytkowania w zależności od ilości użytkowników przebywających na stałe w obiekcie. W literaturze wskazuje się jednak, że najważniejsza z perspektywy efektywności energetycznej jest poprawa termoizolacji obiektu, która zapewnia lepsze parametry, niż zwykle dostosowanie trybu przebywania. Naukowcy dowodzą jednak, że zachowania mieszkańców mają istotny wpływ na zapotrzebowanie, zużycie i zarządzanie energią [75].

Do popularnych działań w zakresie zmniejszenia zużycia energii elektrycznej w obiektach możemy zaliczyć:

- instalowanie energooszczędnych źródeł oświetlenia;
- zastosowanie energooszczędnych odbiorników energii elektrycznej;
- wykorzystanie zmiennej taryfy sprzedaży energii;
- zainstalowanie jednego lub wielu systemów odnawialnych źródeł energii;
- implementacja systemów automatyki, która nadzoruje, zarządza i steruje instalacjami.

Po wykonaniu powyższych działań powinno być rozważane instalowanie lokalnych systemów z OZE, tj. instalacje fotowoltaiczne, kolektory słoneczne, pompy ciepła, turbiny wiatrowe. Opisane powyżej działania związane są z ponoszeniem głównych kosztów w początkowej fazie inwestycji (zakup i instalacja systemu) i uzyskiwaniem istotnych zysków w kolejnych latach użytkowania (darmowe wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła). Konsekwencją tego typu działań i pozytywnym efektem końcowym (podwyższenie efektywności energetycznej budynku i stosowane odnawialnych źródeł energii) może prowadzić do zakwalifikowania obiektu jako zero energetyczny, którego dalsze funkcjonowanie nie wymaga dostaw energii od zewnętrznych dostawców.

Jednym ze skutecznych, lecz nie w pełni wykorzystywanych sposobów, uzyskania oszczędności w zużyciu energii elektrycznej jest wykorzystanie światła dziennego do oświetlenia pomieszczeń [117]. Rozwiązania takie mogą wprowadzić duże oszczędności w zużyciu zarówno energii elektrycznej, jak i ciepła w budynku, jednak wymagają zastosowania specjalistycznych systemów sterujących [120]. Badania dotyczące wykorzystywania światła dziennego do oświetlenia pomieszczeń, koncentrują się w dwóch zasadniczych obszarach. Pierwszym z nich jest doprowadzenie do pomieszczeń wymaganej ilości oświetlenia. W tym celu stosuje się odpowiednie rozwiązania konstrukcyjne obiektu, zapewniające dostarczenie światła dziennego przez otwory okienne oraz różnego rodzaju przeszklenia. Istnieją również bardziej zaawansowane rozwiązania techniczne, które pozwalają na dostarczenie do

pomieszczeń światła dziennego z użyciem kolektorów świetlnych. W ostatnich latach obserwuje się znaczny rozwój systemów optycznych do dodatkowego oświetlenia pomieszczeń światłem słonecznym [44]. Takie rozwiązanie zapewnia oświetlenie pomieszczeń, do których nie dociera światło dzienne, poprzez wykorzystanie światłowodów przekazujących światło, np. z dachu budynku do emiterów oświetlenia zainstalowanych w pomieszczeniu o niewystarczającej dostępności światła dziennego lub bez całkowitego dostępu światła dziennego. Drugim ważnym zagadnieniem związanym z dostępem światła dziennego do pomieszczeń jest sterowanie elektrycznymi obwodami rolet i żaluzji poprzez regulację ich położenia itp. [100]. Wskazane powyżej wykorzystanie światła dziennego do oświetlenia pomieszczeń nie oznacza jeszcze, że uzyskamy automatycznie oszczędności w zużyciu energii elektrycznej w obwodach oświetlenia sztucznego. Do rzadkości należą bowiem przypadki wyłączenia przez użytkowników oświetlenia sztucznego w czasie, kiedy światło dzienne w sposób wystarczający oświetla pomieszczenie. Najczęściej takie sytuacje mają miejsce w budynkach użyteczności publicznej (duże moce systemów oświetleniowych), gdzie głównie ze względu na zaabsorbowanie czynnościami zawodowymi, pracownicy (użytkownicy pomieszczenia) nie mają czasu na wyłączenie, czy też dostosowanie jasności oświetlenia sztucznego. Fakt ten wynika zarówno z zaangażowania w wykonywane czynności zawodowe, jak i niedostatecznie dobrej oceny właściwego natężenia oświetlenia pomieszczenia światłem dziennym. W dalszej części rozprawy przedstawione zostaną rozwiązania, które dowodzą, że wykorzystanie światła dziennego do oświetlenia pomieszczeń, przy zastosowaniu odpowiednio dobranych układów automatyki, przynoszą wymierne efekty ekonomiczne [134].

Tematyka związana z wykorzystaniem światła dziennego w celu oszczędności w zużyciu energii jest aktualna, o czym świadczą badania przeprowadzone w różnych ośrodkach badawczych na świecie. Na Uniwersytecie Technicznym w Istambule realizowano projekt „Światło dzienne w budynkach” [110]. Naukowcy podczas realizacji projektu uwzględnili pomiar oświetlenia w 3 miejscach badanego pomieszczenia za pomocą czujników natężenia oświetlenia. Wyniki badań eksperymentalnych pozwoliły oszacować oszczędność w zużyciu energii na poziomie do 30%. Rozwiązanie takie posłużyło do analizy rozkładu natężenia oświetlenia w badanym pomieszczeniu. Autorzy badań zastosowali sterowanie oświetleniem sztucznym na podstawie danych z trzech czujników, współpracujących w sposób ciągły z komputerem. Rozwiązanie to można traktować, jedynie jako badawcze, gdyż jego implementacja w praktyce jest zbyt kosztowna i technicznie złożona.

Inne podejście do zagadnienia wykorzystania światła dziennego w celu uzyskania oszczędności w zużyciu energii elektrycznej, przedstawiono w pracy [34]. Wyniki badań obejmują monitoring zużycia energii elektrycznej w pomieszczeniach wyposażonych w różne rodzaje sterowania oświetleniem sztucznym. Badania przeprowadzono jednocześnie w trzech sąsiadujących salach lekcyjnych w tym samym budynku szkoły średniej w Belgii. W ramach projektu wszystkie systemy sterowania światłem dziennym działały tylko w trybie automatycznym. Użytkownicy sal lekcyjnych nie mieli możliwości ręcznej regulacji poziomu natężenia oświetlenia sztucznego. W ten sposób porównano wpływ typu układu sterowania na zużycie energii elektrycznej w obwodach oświetlenia sztucznego. Zastosowane układy sterowania z pętlą otwartą jak i z pętlą zamkniętą były wyposażone w czujnik natężenia oświetlenia światła dziennego. We wszystkich salach zamontowano czujnik, który wyłączał automatycznie oświetlenie podczas nieobecności użytkowników. Parametry, charakterystyka oraz przeznaczenie badanego obiektu, są zbliżone do obiektu badań wykonanych na potrzeby rozprawy.

Geun Young Yun i inni [41] ustalili podczas pięciomiesięcznych badań monitorujących zużycie energii elektrycznej w czterech biurach w Korei, że zastosowanie automatycznego sterowania ściemnianiem oświetlenia o projektowym natężeniu 500 lx może zmniejszyć zużycie energii nawet o 43%. Kolejnym przykładem badań dotyczących zmniejszenia zużycia energii elektrycznej w instalacjach oświetleniowych wykorzystujących światło dzienne są badania wykonane przez Aghemo C. i innych [3]. Autorzy w opracowaniu przedstawili wyniki eksperymentalnego studium przypadku dziesięciu biur w Turynie (Włochy), w którym system automatyki i sterowania budynku był wykonany na zamówienie, aby sterować zarówno obwodami oświetleniowymi, jak i systemem klimatyzacji. Badanie zostało przeprowadzone w celu oceny efektywności energetycznej systemu sterowania oświetleniem i analizy warunków świetlnych środowiska uzyskanych poprzez zastosowanie tej technologii w realnym obiekcie. Wydajność środowiskowa i energetyczna, wraz ze stopniem zadowolenia użytkowników i akceptacji tego systemu sterowania, zostały przeanalizowane po roku aktywności w celu weryfikacji potencjału i działania tego systemu sterowania oświetleniem. Uzyskano wyniki dotyczące potencjalnych oszczędności energii (od 17% do 32%). Biorąc pod uwagę zarówno monitorowane roczne zużycie energii elektrycznej podczas eksploatacji urządzeń, jak i pasożytnicze zużycie energii dzięki zainstalowanym urządzeniom (stateczniki do opraw, czujniki i sterowniki).

Podsumowując różne możliwości zwiększenia efektywności energetycznej budynków należy wspomnieć o szerokich możliwościach zastosowania odnawialnych źródeł energii. Zastosowanie systemów OZE w obiektach wpływa na zmniejszenie zużycia energii dostarczanej z zewnętrznych źródeł, co sprawia, że wzrasta efektywność energetyczna obiektu [123]. Zastosowanie odpowiednio dobranych systemów hybrydowych może spowodować, że obiekt stanie się zeroenergetycznym budynkiem, a w niektórych przypadkach nawet może produkować więcej energii, niż stanowią jego potrzeby [117], [126]. Kluczowym wydaje się być użycie odpowiednio dobranej automatyki sterującej oraz odpowiednio opracowanych algorytmów sterowania zarówno od strony wytwarzania energii jak i od strony jej rozdziału i odbioru. Taki system zarządzania energią w budynku jest w stanie efektywnie nadzorować, sterować i monitorować przepływem energii czyniąc obiekt efektywnym energetycznie.

## **2.2. OŚWIETLENIE POMIESZCZEŃ**

### **2.2.1. Parametry i kryteria definiujące jakość oświetlenia w pomieszczeniach**

Podstawowymi pojęciami dotyczącymi oświetlenia pomieszczeń są: światło, strumień świetlny, światłość i natężenie światła. Właściwe zrozumienie tych pojęć jest kluczowe dla analizy zagadnień związanych z badaniami rozkładu natężenia oświetlenia w pomieszczeniach w celu zapewnienia równomiernego jego rozkładu.

Zapewnienie właściwego oświetlenia pomieszczeń i stanowisk pracy jest obowiązkiem każdego pracodawcy, który zgodnie zapisami w Kodeksie pracy [60] jest zobowiązany chronić zdrowie i życie pracowników przez zapewnienie bezpiecznych i higienicznych warunków pracy, przy odpowiednim wykorzystaniu osiągnięć nauki i techniki. Do oceny, jakości oświetlenia pomieszczeń wykorzystane są parametry określone w normie [97]. W dokumencie określono wymagania oświetleniowe dla osób na stanowiskach pracy w pomieszczeniach, które spełniają potrzeby związane z komfortem i wydolnością widzenia osób o normalnej lub skorygowanej do normalnej okulistycznej zdolności widzenia. Do najważniejszych parametrów zalicza się: natężenie oświetlenia, równomierność oświetlenia, rozkład luminancji w polu pracy wzrokowej, ograniczenie olśnienia, barwa światła i oddanie barw (tabela 2.2). Zbiór podstawowych terminów oraz kryteria określania wymagań dotyczących oświetlenia zostały zawarte w normie [84].

Tabela 2.2. Definicje, oznaczenia i jednostki najważniejszych parametrów definiujących jakość oświetlenia pomieszczeń

Źródło: [Opracowanie własne]

Parametr	Definicja	Jednostka
<b>Światło</b>	nazywane inaczej promieniowaniem widzialnym, to energia promieniowania o długości fali 380-760 nm. Jest ona zdolna pobudzić siatkówkę oka i wywołać wrażenie wzrokowe.	[–]
<b>Strumień świetlny</b>	jest parametrem określającym całkowitą moc światła emitowanego z danego źródła. Strumieniem świetlnym nazywamy część promieniowania emitowanego przez źródło światła, która jest widziana przez oko ludzkie w danej jednostce czasu.	lumen [lm]
<b>Światłość</b>	jest wielkością określającą ilość światła wychodzącego ze źródła światła w ściśle określonym kierunku. Liczona jest ona jako iloraz strumienia świetlnego $\varphi$ wysyłanego przez źródło w elementarnym kącie bryłowym $\omega$ zawierającym dany kierunek, do wartości tego elementarnego kąta.	kandela [cd]
<b>Natężenie światła</b>	to wyrażony w luksach stosunek wielkości strumienia świetlnego padającego na płaszczyznę do jej pola powierzchni. Można zatem określić zależność, że $1lx = 1lm /m^2$ .	lux [lx]

**Natężenie oświetlenia ( $E$ )** w danym punkcie powierzchni jest określane definicyjnie jako iloraz elementarnego strumienia świetlnego  $d\varphi$  padającego na elementarną powierzchnię  $dS$ , która stanowi elementarne otoczenie rozpatrywanego punktu oraz jej wartości [153]:

$$E = \frac{d\varphi}{dS} \quad [1lx = 1lm/m^2] \quad (2.1)$$

Można zatem powiedzieć, że natężenie oświetlenia to ilość światła, która pada na powierzchnię, liczona w danym, konkretnym punkcie. W praktyce obliczeniowej wartość natężenia oświetlenia w punkcie powierzchni, w kierunku prostopadłym do powierzchni wyznacza się na podstawie zależności:

$$E = \frac{Id\omega}{dS} = \frac{I}{dS} \cdot \frac{dS}{r^2} = \frac{I}{r^2} \quad [lx] \quad (2.2)$$

Przekształcając równanie (2.1) oraz zakładając, że źródło światła jest punktowe, otrzymujemy wzór na natężenie oświetlenia w postaci:

$$E_p = \frac{I}{r^2} \cdot \cos \alpha = \frac{I}{h^2} \cdot \cos^3 \alpha \quad [\text{lx}] \quad (2.3)$$

gdzie:

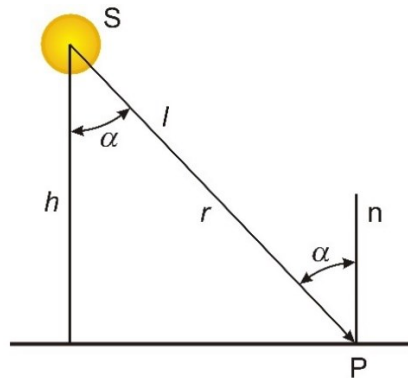
$I$  – światłość w kierunku punktu P [cd],

$r$  – odległość źródła oświetlenia od punktu P [m],

$\alpha$  – kąt między normalną do powierzchni poziomej  $n$  i kierunkiem padania światła [°],

$h$  – wysokość źródła światła nad analizowaną płaszczyzną [m].

Na rysunku 2.2 przedstawiono przykład oświetlenia punktu P przez pojedyncze źródło S. W odniesieniu do przeprowadzonych badań, tym źródłem jest słońce oraz źródło oświetlenia sztucznego zainstalowane w oprawach oświetleniowych. Natomiast punkt P jest punktem referencyjnym na wysokości powierzchni roboczej ustalonej na wysokości 75 cm od powierzchni podłogi.



Rys. 2.2. Natężenie oświetlenia  $E$  w punkcie P danej płaszczyzny, gdzie:  $E_p$  – natężenie w punkcie P danej płaszczyzny [lx],  $I$  – światłość w kierunku punktu P [cd],  $r$  – odległość źródła do punktu P [m],  $\alpha$  – kąt między normalną  $n$  i kierunkiem padania światła [°],  $h$  – wysokość źródła nad rozpatrywaną płaszczyzną [m]

Źródło: Opracowanie własne wg [53]

Chcąc dokonać obliczeń rozkładu natężenia oświetlenia światła dziennego, należy przyjąć zależności, które stosujemy przy obliczeniach natężenia oświetlenia wywołanego przez okrągłą tarczę świecącą o stałej luminancji. Wówczas natężenie oświetlenia będzie opisywane zależnością:

$$E = \int L \cos \gamma \, d\omega \quad [\text{lx}] \quad (2.4)$$

Stosując wzory dla brył o symetrii obrotowej:

$$\omega = 2\pi (1 - \cos \gamma) \quad d\omega = 2\pi \sin \gamma \, d\gamma \quad (2.5)$$

otrzymujemy:

$$E = \pi L \sin^2 \gamma \quad [\text{lx}] \quad (2.6)$$

gdzie:

$E$  – światłość w kierunku punktu P [cd],

$L$  – luminancja [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ],

$\gamma$  – kąt horyzontalny [ $^\circ$ ],

$\omega$  – kąt bryłowy [sr].

Takie działania są czysto teoretyczne, a ich zastosowanie w praktyce, np. do opracowania algorytmów sterowania oświetleniem, jest trudne i nie zapewniają często oczekiwanego efektu. Każde miejsce, pomieszczenie czy powierzchnia oświetlana cechuje się indywidualnymi parametrami, czynnikami, o których wspomniano w rozdziale 2.2.6. Badania rozkładu natężenia oświetlenia w pomieszczeniu zapewniają otrzymanie rzeczywistych wartości natężenia oświetlenia w danych punktach pomieszczenia. Otrzymane wyniki wykorzystujemy do implementacji systemów sterowania. Dzięki odpowiednim wartościom natężenia oświetlenia można zapewnić równomierność oświetlenia na całej powierzchni pomieszczenia. Równocześnie eliminujemy zbędne oświetlenie sztuczne, które może zostać, np. wyłączone w oprawach, które oświetlają miejsca, w których natężenie światła dziennego jest wystarczające. Równomierność natężenia oświetlenia jest ważnym czynnikiem w pomieszczeniach, w których są wykonywane, np. czynności ciągłe. Zaliczamy do nich między innymi pomieszczenia przeznaczone do celów edukacyjnych, jak sale wykładowe. Brak równomierności natężenia oświetlenia może wywoływać negatywne skutki, takie jak zmęczenie, które wynika z konieczności adaptacji narządu wzroku do zmiennego rozkładu natężenia oświetlenia [20].

Wartość średniego natężenia oświetlenia  $E_{sr}$  dla każdego zadania wzrokowego powinno mieć minimalną wartość określoną w normie [97]. Parametry te muszą być spełnione niezależnie od rodzaju i stanu instalacji oświetleniowej. Podane we wspomnianej normie średnie wartości natężenia oświetlenia odnoszą się do normalnych warunków widzenia, z uwzględnieniem następujących czynników:

- wymagań dla zadań wzrokowych;
- psychofizjologicznych, takich jak wygoda widzenia i dobre samopoczucie;
- ergonomii widzenia;
- wpływu na bezpieczeństwo;
- doświadczeń praktycznych.



Natężenie oświetlenia jest wielkością zawartą w większości wytycznych i norm, jako parametr charakteryzujący oświetlenie danej powierzchni. Z tego powodu przy wyznaczaniu rozkładów natężenia oświetlenia podstawową procedurą są obliczenia rozkładu natężenia oświetlenia wybranych powierzchni danych pomieszczeń. Natężenie oświetlenia jest podstawową wielkością, która definiuje wymaganą wartość oświetlenia na danej powierzchni w pomieszczeniach. Zapewnienie odpowiedniego, wymaganego poziomu natężenia oświetlenia, a także jego rozkładu ma wpływ na szybkość i jakość wykonywania zadania wzrokowego. Możemy zdefiniować kilka rodzajów natężenia oświetlenia, w zależności od miejsca jego występowania oraz intensywności. Przy określaniu, badaniu natężenia oświetlenia musimy brać pod uwagę szereg innych istotnych czynników, parametrów, mających bezpośredni związek z określeniem parametru natężenia oświetlenia w danym obszarze, na powierzchni. Do najważniejszych rodzajów parametrów natężenia oświetlenia i wielkości z nim powiązanych możemy zaliczyć:

**Natężenie oświetlenia w polu bezpośredniego otoczenia** – uzależnione jest od natężenia oświetlenia w polu zadania i zaleca się, aby zapewniało wystąpienie zrównoważonego rozkładu luminancji w polu zadania, czyli aby zapewniało równomierny rozkład luminancji w polu widzenia.

**Średnie natężenie oświetlenia ( $\bar{E}$ )** – stanowi uśrednioną wartość natężenia dla danej powierzchni:

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i \quad [lx] \quad (2.7)$$

gdzie:

$n$  – liczba punktów pomiarowych [-],

$E_i$  – natężenie oświetlenia w punkcie pomiarowym [lx].

W praktyce średnie natężenie oświetlenia wyznaczamy z podzielenia całkowitego strumienia świetlnego emitowanego przez każdą oprawę oświetleniową i padającego na płaszczyznę roboczą, przez całkowite pole tej powierzchni przestrzeni lub średniego natężenia oświetlenia dla reprezentatywnej liczby punktów tej powierzchni. Można zdefiniować minimalne, maksymalne i eksploatacyjne natężenie oświetlenia. Ponadto istnieje jeszcze szereg ważnych pojęć związanych z światłem, oświetleniem. Poniżej scharakteryzowano krótko najważniejsze z nich.

**Natężenie minimalne oświetlenia ( $E_{min}$ )** – jest najmniejszą wartością natężenia oświetlenia w jednym z przyjętych punktów na danej powierzchni. Najmniejsze minimalne natężenie oświetlenia nie może być mniejsze od natężenia określonego w normach.

**Natężenie maksymalne oświetlenia ( $E_{max}$ )** – jest największą wartością natężenia oświetlenia w jednym z przyjętych punktów na danej powierzchni. Zbyt wysokie natężenie oświetlenia jest negatywnym i szkodliwym dla oczu zjawiskiem mogącym prowadzić do nadmiernego zmęczenia.

**Eksploatacyjne natężenie oświetlenia ( $\bar{E}_m$ )** – wartość natężenia oświetlenia od której nie może być mniejsza wartość średniego natężenia oświetlenia na płaszczyźnie roboczej:

$$\bar{E}_m \leq \bar{E}$$

**Luminancja (L)** inaczej jaskrawość, blask – jest miarą ilości światła padającego w danym kierunku i opisywana jest zależnością:

$$L = \frac{d^2\varphi}{d\omega \cdot dS \cdot \cos \alpha} \quad \left[ \frac{cd}{m^2} \right] \quad (2.8)$$

gdzie:

$\varphi$  – strumień świetlny przypadający na jednostkę kąta bryłowego [lm],

$\omega$  – kąt bryłowy [sr],

$S$  – pole powierzchni [ $m^2$ ],

$\alpha$  – kąt pomiędzy normalną powierzchniową  $s$ , a rozpatrywanym kierunkiem [ $^\circ$ ].

Wartość i rozkład luminancji mają wpływ na poziom adaptacji narządu wzroku, czyli jakość i komfort widzenia. Można stwierdzić, że warunki widzenia są najlepsze, gdy całe obwodowe pole widzenia ma równomierną luminancję. Zbyt duża luminancja lub zbyt szybka jej zmiana powoduje zjawisko olśnienia. Z kolei praca przy zbyt małych wartościach luminancji powoduje zmęczenie i osłabienie wzroku.

**Światłość (I)** – jest jednostką fotometryczną analogiczną do natężenia promieniowania  $I_e$  charakteryzującego promieniowanie od strony energetycznej. W pojęciu światłości jak i luminancji pojawia się natężenie światła. Zarówno luminancja jak i światłość zależą od kierunku. Im większy poziom natężenia światła, tym wyższa jest luminancja danego obiektu. Są to jednak dwa różne pojęcia. Luminancja opisuje bowiem ilość światła, która nie tylko jest emitowana przez dane źródło, ale także zostaje od niego odbita. Można zatem powiedzieć, że pewną luminancję mogą posiadać te obiekty, które same w sobie nie są źródłem światła.

Ponadto luminancja, w przeciwieństwie do światłości, nie zależy od odległości danego obiektu od obserwatora.

**Równomierność oświetlenia ( $\delta$ )** – określana, jako stosunek minimalnego natężenia oświetlenia do średniego natężenia oświetlenia na danej powierzchni:

$$\delta = \frac{E_{min}}{\bar{E}} \quad [-] \quad (2.9)$$

gdzie:

$E_{min}$  – najmniejsze natężenie oświetlenia na danej płaszczyźnie [lx],

$\bar{E}$  – średnie natężenie oświetlenia na oświetlanej płaszczyźnie [lx].

Równomierność natężenia oświetlenia na płaszczyźnie roboczej, na której praca wykonywana jest w sposób ciągły, powinna wynosić minimum 0,65. Równomierność natężenia oświetlenia pochodzącego od oświetlenia sztucznego lub od światła dachowego powinna wynosić:

– w polu bezpośredniego otoczenia  $U_o \geq 0,40$ ,

– w obszarze tła  $U_o \geq 0,10$ .

**Współczynnik oświetlenia dziennego ( $D$ )** – określany jest jako stosunek natężenia oświetlenia w dowolnym punkcie płaszczyzny oświetlonej bezpośrednim lub pośrednim światłem z nieboskłonu, o założonym lub znanym rozkładzie luminancji, do natężenia oświetlenia na płaszczyźnie oświetlonej światłem z nieosłoniętej półkuli tego nieboskłonu. Podczas określania współczynnika oświetlenia dziennego, dla obu natężeń oświetlenia wyłączony jest bezpośredni udział światła słonecznego.

**Skuteczność świetlna ( $\eta$ )** – to stosunek strumienia świetlnego wytwarzanego przez źródło do mocy całkowitej układu P:

$$\eta = \frac{\varphi}{P} \quad [-] \quad (2.10)$$

gdzie:

$\eta$  – skuteczność świetlna [-],

$\varphi$  – strumień świetlny [lm],

$P$  – moc znamionowa [W].

**Strefa robocza** – część pomieszczenia przeznaczona do wykonywania czynności pracy, dla których określa się wielkości charakteryzujące oświetlenie.

**Pole zadania** – to część pola w miejscu pracy, na którym wykonywane jest zadanie wzrokowe; w miejscach, w których wielkości i/lub położenie pola zadania są nieznane. Za pole zadania uznaje się pole, na którym zadanie może być wykonywane.

**Olśnienie** – zjawisko opisujące stan procesu widzenia, w którym odczuwa się dyskomfort widzenia lub występującą ograniczoną zdolność rozpoznawania szczegółów.

Podstawowym źródłem olśnienia jest niewłaściwy rozkład luminancji, zbyt duży rozkład luminancji lub występujący nadmierny kontrast.

**Naświetlenie ( $H$ )** – jest to suma po czasie iloczynów chwilowych wartości natężenia oświetlenia  $E(t)$  w danym punkcie oraz czasu trwania  $dt$  [150]:

$$H = \frac{dQ}{dA} = \int_0^t E(t) dt \quad [\text{lx} \cdot \text{s}] \quad (2.11)$$

Inaczej możemy określić naświetlenie jako gęstość powierzchniową ilości światła  $dQ$  padającego na elementarną powierzchnię  $dA$ .

**Barwa światła [K]** – oznacza temperaturę koloru danego źródła światła. Określana poprzez temperaturę barwową, która jest mierzona jest w jednostkach temperatury z układu SI, czyli w kelwinach (K). Barwa światła może być ciepła lub zimna, w zależności od wskaźnika Kelwinów. Im wyższy wskaźnik Kelwinów [K], tym światło jest zimniejsze i bielsze, bądź bardziej niebieskie.

Wykorzystanie światła dziennego do oświetlenia pomieszczeń jest ważnym i korzystnym działaniem, ponieważ światło dzienne może stanowić całkowite oświetlenie dla zadań wzrokowych lub może dostarczać znaczącą część tego oświetlenia i dlatego jest źródłem potencjalnych oszczędności energii [122]. Dodatkowo, z upływem czasu światło naturalne zmienia swoje natężenie, kierunek i skład widmowy, co jest korzystnie odbierane przez osoby pracujące i przebywające we wnętrzach. W celu uzyskania jak najlepszych parametrów oświetlenia pomieszczenia należy odpowiednio zaprojektować i opracować sterowanie oświetleniem sztucznym. Najpewniejszym i najskuteczniejszym rozwiązaniem jest przeprowadzenie pomiaru rozkładu natężenia oświetlenia w pomieszczeniu, w którym ma być zastosowane odpowiednie sterowanie oświetleniem sztucznym. Uzyskane wyniki pozwolą na określenie stanu pracy poszczególnych źródeł oświetlenia sztucznego (zał/wył) lub wartości mocy źródeł oświetlenia w konkretnym miejscu pomieszczenia (ściemnij/rozjaśnij). Realizacja odpowiedniego sterowania jest możliwa na podstawie wyników rozkładu natężenia oświetlenia,

które zaimplementowane do urządzeń sterujących, pozwalają na efektywne i ekonomiczne oświetlenie pomieszczenia.

Zgodnie z normą [97] zaleca się, aby natężenia oświetlenia we wszystkich zamkniętych pomieszczeniach na głównych powierzchniach we wnętrzach, powinny mieć następujące wartości:

$$E_{\dot{s}r} > 50 \text{ lx z } \delta \geq 0,10 \text{ na ścianach;}$$

$$E_{\dot{s}r} > 30 \text{ lx z } \delta \geq 0,10 \text{ na suficie;}$$

gdzie:

$\delta$  – równomierność oświetlenia elektrycznego [–],

$E_{\dot{s}r}$  – średnia wartość natężenia oświetlenia [lx].

Istnieje możliwość odstępstw od zalecanych wartości poziomów natężenia oświetlenia na powierzchniach, na których nie jest możliwe osiągnięcie wymaganych wartości natężenia oświetlenia. Natomiast w niektórych zamkniętych miejscach, takich jak korytarze, schody, sale wykładowe, pomieszczenia biurowe, zaleca się, aby sufity i ściany były jasnego koloru.

W takich miejscach natężenia oświetlenia na głównych powierzchniach powinny mieć następujące wartości:

$$E_{\dot{s}r} > 75 \text{ lx z } \delta \geq 0,10 \text{ na ścianach,}$$

$$E_{\dot{s}r} > 50 \text{ lx z } \delta \geq 0,10 \text{ na suficie.}$$

Poziom natężenia oświetlenia i jego rozkład w polu zadania wzrokowego i jego otoczeniu mają duży wpływ na to, jak szybko, bezpiecznie i wygodnie człowiek dostrzeże i wykona zadanie wzrokowe. Określenie właściwego poziomu natężenia oświetlenia we wnętrzu lub na stanowisku pracy jest jednym z podstawowych problemów techniki świetlnej.

Według PN-HD 12464-1:2012 oraz zgodnie z PN-EN 12665:2011, dla zapewnienia postrzegalnych różnic natężenia oświetlenia w normalnych warunkach oświetleniowych przyjęto następujące zalecane stopniowanie natężenia oświetlenia (w lx): 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 3000, 5000.

Norma PN-EN 12464-1 określa także w jakich przypadkach można zwiększyć lub zmniejszyć natężenie oświetlenia w pomieszczeniach. Jest to bardzo istotne, gdyż wpływa nie tylko na komfort i jakość pracy osób użytkujących dane pomieszczenia, ale także przekłada się bezpośrednio na zużycie energii elektrycznej. Zwiększenie wymaganego natężenia oświetlenia w pomieszczeniu możliwe jest w przypadkach, kiedy:

– wykonywana praca wzrokowa jest bardzo trudna;

- przedmiotem pracy są małe wymiary lub mały kontrast;
- wymagana jest duża dokładność lub wysoka wydajność pracy;
- zdolność wzrokowa pracownika jest poniżej normalnej;
- naprawianie popełnionych błędów jest nieopłacalne;
- czas wykonywania zadań jest niezwykle długi.

Natomiast zmniejszenie wymaganego natężenia oświetlenia w pomieszczeniu, możliwe jest jedynie w dwóch przypadkach, gdy:

- czas wykonywania zadań jest bardzo krótki;
- przedmiotem pracy są wyjątkowo duże wymiary lub wysoki kontrast.

**Współczynnik odbicia światła (Albedo)** – parametr określający zdolność odbijania światła przez daną powierzchnię. Wielkość bezwymiarowa o wartościach w zakresie od 0 do 1.

### 2.2.2. Analiza i wybór metod pomiaru natężenia oświetlenia

W celu wykonania poprawnego pomiaru oświetlenia w pomieszczeniu należy skorzystać z normy PN-EN 12464-1 „Technika świetlna - Oświetlenie miejsc pracy – część 1: Miejsca pracy wewnątrz pomieszczeń”. Norma ta jest zgodna z analogiczną normą europejską i dotyczy parametrów oświetlenia większości pomieszczeń i stanowisk pracy. Wyjątek stanowią, np. miejsca pracy na zewnątrz oraz części podziemne kopalń. Wspomniana norma zawiera opis procedury pomiaru natężenia światła w pomieszczeniu lub na stanowisku pracy.

Pomiary natężenia oświetlenia powinny być wykonywane na odpowiedniej płaszczyźnie zadania – wysokości referencyjnej. Jeśli nie ma określonej wysokości referencyjnej, np. powierzchni blatu stołu, biurka, to wówczas badania rozkładu natężenia oświetlenia w pomieszczeniach wykonuje się na wysokości referencyjnej 85 cm od poziomu podłogi. Celem dokonania pomiaru dowolnego mezurandu jest uzyskanie możliwie dokładnego wyniku. Należy jednak mieć świadomość, że wskazanie przez przyrząd pomiarowy wartości mierzonej zawsze obarczone jest niepewnością pomiarów. W związku z tym, pomiar powinno się traktować jako proces wyznaczania wartości mierzonej i jej niepewności. Wyznaczenie niepewności pomiarowej jest konieczne dla każdej procedury pomiarowej. Wynika to między innymi z wymagania normy PN-EN ISO 2012, w której zawarte są informacje dotyczące niepewności pomiaru, jako istotnego parametru w procesie wzorcowania. Proces ten odbywa się w laboratoriach pomiarowych, w których ustala się zależności pomiędzy wartościami wielkości mierzonej wskazanymi przez przyrząd pomiarowy, a odpowiednimi wartościami wielkości

fizycznych, realizowanymi przez wzorzec jednostki miary wraz z podaniem niepewności tego pomiaru. Współczesne wyrażanie i obliczanie niepewności pomiaru zdefiniowane jest przez pakiet dokumentów wydanych przez Międzynarodowe Biuro Miar. Podstawowym dokumentem jest przewodnik Głównego Urzędu Miar dotyczący wyrażania niepewności pomiaru [15]. Przedstawia on między innymi metodę propagacji niepewności. Dokument zawiera wytyczne, co do metody propagacji rozkładów realizowanej przy zastosowaniu symulacji Monte Carlo. Pomiar natężenia oświetlenia realizowane w technice świetlnej wykonywane powinny być urządzeniami posiadającymi atesty wzorcowania. Natężenie oświetlenia w technice pomiarowej jest takim parametrem, od którego często w praktyce nie wymaga się bardzo dużej dokładności.

Obliczenie wartości natężenia oświetlenia jest złożoną sprawą i wymaga znajomości parametrów związanych z położeniem Słońca oraz nieboskłonem. Dla znanego maksymalnego kąta horyzontalnego i rozkładu luminancji nieboskłonu, oblicza się poziome natężenie oświetlenia od światła dziennego. Po podwójnym scałkowaniu zależności dla pełnego zakresu kątów azymutalnych przemnożeniu jej przez luminancję  $L_{VZ}$ , rezultatem będzie określenie poszukiwanego natężenia oświetlenia na powierzchni poziomej [95]. Wspomniane natężenie oświetlenia światła dziennego na powierzchni poziomej w przestrzeni otwartej określa się według następującego wzoru:

$$E_{Vd} = \int_{Z=0^{\circ}}^{90^{\circ}} \int_{\gamma=0^{\circ}}^{260^{\circ}} L_{\alpha} \sin Z \cos Z d\gamma dZ \quad [1x] \quad (2.12)$$

gdzie:

$L_{\alpha}$  – luminancja nieboskłonu, przy określonym azymucie, w odniesieniu do luminancji w Słońca zenicie  $L_{VZ}$  [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ],

$Z$  – kąt padania światła w zenicie dla danego nieboskłonu (maksymalny kąt horyzontalny) [ $^{\circ}$ ].

$\gamma$  – kąt azymutalny Słońca [ $^{\circ}$ ].

Natężenie promieniowania słonecznego, które dociera do okien, określamy wzorem:

$$E_{Vd} \approx L_{VZ} \sum_{\gamma=1}^{90^{\circ}} \sum_{\alpha=1}^{360^{\circ}} R \Delta S \quad [1x] \quad (2.13)$$

gdzie:

$L_{VZ}$  – luminancja nieboskłonu [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ],

$R$  – wskaźnik luminancji [–],

$\gamma$  – kąt horyzontalny Słońca [ $^{\circ}$ ],

$\Delta S$  – pole powierzchni, na które pada strumień świetlny [ $\text{m}^2$ ].

### 2.2.3. Przyrządy pomiarowe parametrów oświetlenia pomieszczeń

Do pomiaru natężenia światła wykorzystuje się luksomierze. Przyrządy te działają na zasadzie pomiaru strumienia świetlnego, pochodzącego z półprzestrzeni. Wartość mierzonego promieniowania, ma się zmieniać zgodnie z funkcją kosinusa kąta padania tegoż promieniowania, na głowicę fotometryczną. Oznacza to, że głowica musi być zorientowana przestrzennie. Luksomierze wyposażone są w głowicę fotometryczną (powierzchnia światłoczuła), która wchodzi w skład miernika wraz z jednostką sterującą, dzięki której użytkownik obsługuje miernik. Światło padające na głowicę jest odbierane i oceniane kierunkowo. Dokonując pomiarów natężenia oświetlenia, głowica pomiarowa musi reagować na docierający strumień świetlny dokładnie tak samo, jak standardowy obserwator. Pole pomiarowe jest to suma wszystkich punktów promieniujących w kierunku pola odbioru, które odbiera odbiornik i mierzy z czułością kierunkową nie mniejszą niż 10% czułości maksymalnej. Powierzchnia odniesienia to powierzchnia głowicy fotometrycznej, dla której jest mierzone natężenie oświetlenia.

Rozróżnia się luksomierze:

- a) ze względu na rodzaj urządzenia wskazującego:
  - z odczytem analogowym,
  - z odczytem cyfrowym,
- b) ze względu na rodzaj odbiornika promieniowania:
  - z ogniwnem fotoelektrycznym,
  - z fotopowielaczem,
  - z fotodiodą,
- c) ze względu na filtr rozszerzający zakres pomiarowy:
  - z nakładanym filtrem,
  - bez filtru.

Zasada działania luksomierza opiera się na wykorzystaniu efektu fotoelektrycznego, w wyniku, którego (przy oświetleniu powierzchni światłoczułej odbiornika) wytwarzany jest w obwodzie elektrycznym prąd fotoelektryczny, wskazywany przez miernik prądu. W technice świetlnej stosowane są do pomiarów następujące czujniki: przetworniki fotoelektryczne, fotorezystory, fotodiody i fototranzystory. Przetwornikiem fotoelektrycznym jest element obwodu elektrycznego, który pod wpływem promieniowania, głównie z zakresu widzialnego, zmienia swój stan elektryczny. Pod wpływem napromieniowania światłem na jego zaciskach



wyjściowych pojawia się siła elektromotoryczna. Napięcie wzrasta, gdy większy jest poziom oświetlenia czujnika. Wzrost nie jest liniowy i nie można wykorzystać zależności  $U = f(E)$  do pomiarów. Liniowa pozostaje zależność prądu fotoelektrycznego do natężenia oświetlenia  $I_f = f(E)$ .

#### 2.2.4. Wykorzystanie światła dziennego do oświetlenia wnętrza

Warunki oświetleniowe wywierają znaczący wpływ na szybkość i dokładność oraz wysiłek związany w wykonywaniu zadań. Wpływają także na samopoczucie, zdrowie i codzienne funkcjonowanie człowieka. Światło widzialne odgrywa kluczową rolę w życiu człowieka [139]. Bodźce świetlne poprzez narząd wzroku dostarczają człowiekowi ponad 80% informacji dotyczących otaczającego go środowiska [53]. Światło wyznacza rytm dobowy i wpływa bezpośrednio na aktywność organizmu. Promienie słoneczne są najbardziej przyjaznym źródłem światła dla wzroku i naturalnie pobudzają organizm do pracy eliminując, np. poczucie senności. Światło dzienne jest zatem dla człowieka najzdrowszym rodzajem światła. Promieniowanie widzialne stanowi 47% promieniowania słonecznego. Promieniowanie słoneczne to rodzaj fali elektromagnetycznej o zakresie długości fal od  $10^{-4}$   $\mu\text{m}$  (promieniowanie rentgenowskie i gamma) do  $10^5$  m (fale radiowe). Światło dzienne jest promieniowaniem widzialnym, którego barwy zdolne jest zarejestrować ludzkie oko. Jego długość fali zawiera się w zakresie od 0,38  $\mu\text{m}$  do 0,78  $\mu\text{m}$ . Barwa światła dziennego jest odczuwalna przez oko ludzkie jako przyjemna, ponieważ jego widmo ma charakter ciągły. Poza tą częścią promieniowania słonecznego istnieje jeszcze promieniowanie podczerwone, które odczuwamy w postaci ciepła. Stanowi ono 46% całkowitego promieniowania słonecznego.

Słońce emituje strumień światła  $3,75 \cdot 10^{28}$  lm. Traktując je jak izotropowe źródło światła daje nam to ok.  $2,986^{27}$  [cd] światłości (1 cd to  $4\pi$  lumenów).

Korzystając ze wzoru na natężenie oświetlenia w fotometrii (luminancji):

$$E = \frac{I}{r^2} \quad [lx] \quad (2.14)$$

otrzymujemy wynik 132 696,39 [lx]. Oznacza to, że ze Słońca do Ziemi dociera strumień świetlny dający natężenie światła w granicach 130 000 luksów (z czego ok. 30% pochłania atmosfera, więc do powierzchni Ziemi dociera ok. 100 000 lx).

Luminancja odzwierciedla ilość światła, która jest widziana przez obserwatora. Luminancja (w określonym kierunku, w punkcie powierzchni źródła albo odbiornika promieniowania) jest

to iloraz strumienia świetlnego wychodzącego, padającego lub przenikającego przez elementarne pole powierzchni otaczające rozpatrywany punkt i rozchodzącego się w określonym stożku obejmującym ten kierunek, przez iloczyn kąta bryłowego tego stożka i rzutu prostokątnego elementarnego pola na płaszczyznę prostopadłą, do tego kierunku. Luminancja określana jest wzorem:

$$L = \frac{d^2\phi}{d\omega \cdot ds \cdot \cos \alpha} \quad \text{czyli} \quad L = \frac{I}{S'} \quad (2.15)$$

gdzie  $S'$  jest powierzchnią pozorną świecącej powierzchni widzianą przez obserwatora.

Luminancję płaszczyzny odbijającej w sposób rozproszony obliczamy jako:

$$L = \frac{\rho}{\pi} E \quad (2.16)$$

gdzie:

- $L$  – luminancja [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ],
- $\rho$  – współczynnik odbicia [–],
- $E$  – natężenie oświetlenia na płaszczyźnie [ $\text{lx}$ ].

Jest to wzór dający poprawne wyniki dla powierzchni o rozproszonym charakterze odbicia. Może być on stosowany z wystarczającą dokładnością dla takich niebłyszczących powierzchni jak:

- matowo malowane ściany,
- standardowej jakości papier,
- dywany itp.

Zatem dla tych powierzchni jest bezpośrednia zależność między natężeniem oświetlenia, a luminancją. Im większy poziom natężenia oświetlenia tym większa luminancja obiektu.

Badania wykazały, że wartość natężenia światła dziennego ma istotny wpływ na samopoczucie, koncentrację i wydajność pracy człowieka. Eksperyment przeprowadzony przez Uniwersytet Paryski w kilku krajach, w którym udział wzięło 2387 uczniów wykazał, że wyniki w nauce mogą wzrosnąć nawet o 22%, gdy uczniowie pracują w klasach z większymi oknami – zarówno z powodu zwiększonego światła dziennego, jak i lepszego widoku na świat zewnętrzny [68]. Również badanie, które zostało przeprowadzone przez Uniwersytet Salford w Wielkiej Brytanii, wykazało, że odpowiednia ilość światła dziennego pomaga stworzyć poczucie komfortu fizycznego i psychicznego, a jego korzyści są bardziej dalekosiężne,

niż tylko wspomaganie dobrego widzenia [13]. Światło dzienne powinno być w pełni lub częściowo wykorzystane do oświetlenia zadań wzrokowych, powierzchni użytkowej w pomieszczeniach i dlatego jest źródłem potencjalnych możliwości oszczędności energii elektrycznej [125]. Jak wykazały przeprowadzone badania w ciągu dnia światło docierające do okien pomieszczeń wykazuje zmiany intensywności i składu widmowego, dlatego jest czynnikiem zmienności natężenia oświetlenia we wnętrzach. Światło dzienne może kreować specyficzne rozkłady luminancji, wywołane niemal poziomym kierunkiem wchodzenia światła przez okna. Wyniki badań dostępności światła dziennego w różnych porach roku i warunkach atmosferycznych zostały przedstawione w rozdziale 5.4, natomiast oszczędności w zużyciu energii elektrycznej wynikające z wykorzystania światła dziennego do oświetlenia wnętrz zostały oszacowane w rozdziale 6.5 niniejszej rozprawy.

### **2.2.5. Sztuczne źródła oświetlenia wnętrz**

Elektryczne źródła światła nie posiadają tych naturalnych i korzystnych dla człowieka cech, które ma światło naturalne, dzienne. Charakteryzują się tym, że są źródłem olśnienia ze względu na dużą luminancję, a ich widma mają zazwyczaj charakter nieciągły. Strumień świetlny jest jedną z najważniejszych wielkości fotometrycznych opisujących elektryczne źródła światła i jest określany jako moc promieniowania wywodzącą się z danego źródła światła. Wielkość tę określa się na podstawie zdolności wywołania widzenia przez oko ludzkie, tzn. widzenie dokładne i z rozróżnieniem barw. Rozwój źródeł światła ukierunkowany jest na poszukiwanie rozwiązań o wysokiej skuteczności świetlnej, dużej trwałości eksploatacyjnej oraz możliwości masowej produkcji przy jak najniższych kosztach. Elektryczne źródła światła stosowane do celów oświetleniowych można podzielić na trzy zasadnicze grupy: żarowe, wyładowcze oraz LED. Natomiast ze względu na sposób wytwarzania widzialnego promieniowania elektromagnetycznego – światła, dzielimy na:

- a) inkadescencyjne:
  - żarowe,
  - temperaturowe – (halogenowe, gazowe, próżniowe);
- b) luminescencyjne, wyładowcze (fluorescencyjne, tzw. świetlówki kompaktowe/liniowe);
- c) LED, źródła światła stałego (diody elektroluminescencyjne);
- d) mieszane.

Inkadescencja jest to proces emisji światła, który zachodzi w wyniku cieplnego wzbudzenia atomów lub cząsteczek. Ciepło wytwarzane jest podczas przepływu prądu elektrycznego przez

ciało stałe bądź ciecz. W wyniku tego zjawiska powstają drgania i ruch obrotowy, w konsekwencji cząsteczki mają wyższy poziom energetyczny i zostaje wytworzony kwant promieniowania.

W źródłach żarowych światło emitowane jest przez włókno, np. wolframowe, które rozgrzewa się do wysokiej temperatury w wyniku przepływającego prądu.

W lampach wyładowczych światło powstaje poprzez wzbudzenie atomów gazu lub pary, które znajdują się pomiędzy dwiema elektrodami. Ze względu na ciśnienie gazu można wyodrębnić dwa rodzaje lamp wyładowczych: niskoprężne i wysokoprężne. Przy wyłączeniu lamp wysokoprężnych wyładowczych (znanych także jako wysokowydajne lampy wyładowcze lub HID) istnieje konieczność ich schłodzenia przez kilka minut przed ponownym włączeniem. Odgrywa to istotną rolę w przypadku chwilowego zaniku napięcia i konieczności natychmiastowego, ponownego rozruchu źródeł światła.

LEDowe źródła światła działają wykorzystując zjawisko rekombinacji nośników ładunków w półprzewodniku. Podczas przejścia elektronów z wyższego poziomu energetycznego na niższy energia elektronu zostaje zamieniona na kwant promieniowania elektromagnetycznego. Diody LED są coraz częściej stosowane do oświetlenia wewnętrznego jak i zewnętrznego.

Podstawowym zadaniem elektrycznych źródeł światła jest przetwarzanie dostarczonej energii elektrycznej na promieniowanie widzialne. W obecnie stosowanych źródłach oświetlenia elektrycznego wykorzystywane są dwie zasadnicze grupy źródeł światła: żarowe oraz wyładowcze. Do grupy źródeł żarowych zalicza się wszystkie odmiany żarówek tradycyjnych oraz halogenowych. Natomiast do grupy źródeł wyładowczych należą: świetlówki, lampy rtęciowe, sodowe oraz indukcyjne.

Żarówki halogenowe charakteryzują się mniejszymi wymiarami i większą skutecznością świetlną oraz większą trwałością, niż tradycyjne. Należy jednak pamiętać, że żarówki halogenowe w sposób znaczący emitują promieniowanie w zakresie nadfioletu, co może być niebezpieczne dla zdrowia ludzi. Dlatego też, szczególnie w oprawach otwartych, należy stosować tylko takie źródła, które posiadają filtr UV.

Kolejną grupą są świetlówki (lampy fluorescencyjne). Do tej popularnej wciąż jeszcze grupy źródeł światła zaliczamy lampy wyładowcze, rtęciowe, w których promieniowanie nadfioletowe (uzyskane na drodze elektroluminescencji) jest przetwarzane na światło widzialne przez warstwę luminoforu (zjawisko fotoluminescencji). Świetlówki produkowane są w kształcie rur prostych lub kolistych oraz o budowie zwartej (tzw. kompaktowe).

Rtęciowe lampy wysokoprężne zaliczamy do grupy lamp wyładowczych, w których znacząca część światła pochodzi z wyładowania łukowego, które zachodzi w parach rtęci w warunkach podwyższonego ciśnienia w jarzniku (tylko 10% energii zamieniana jest na promieniowanie widzialne, pozostała zaś na ciepło i promieniowanie nadfioletowe). Bańka zewnętrzna może być przezroczysta lub pokryta luminoforem – wówczas dodatkowa część światła wytwarzana jest przez warstwy luminoforu wzbudzone przez promieniowanie nadfioletowe pochodzące z wyładowania. Odmianą rtęciowych źródeł światła są lampy metalohalogenkowe (rtęciowo-halogenkowe) oraz o świetle mieszanym (rtęciowo-żarowe).

Lampy sodowe wysokoprężna są lampami wyładowczymi, w których światło pochodzi głównie z promieniowania par sodu w warunkach podwyższonego ciśnienia panującego w jarzniku. Lampy te charakteryzują się żółto-pomarańczową barwą. Oddawanie barw nie jest zbyt dobre, ale lepsze niż dla lamp sodowych niskoprężnych. Ponowny zapłon lampy po jej zgaśnięciu możliwy jest już po około 1 minucie. Ze względu na wysoką skuteczność świetlną, sięgającą do wartości 130 lm/W stosowane są głównie do oświetlania zewnętrznego, np. ulice, place, drogi, mosty itp.

Lampy sodowe niskoprężne są to lampy wyładowcze, w których światło jest wytwarzane przez promieniowanie par sodu. Lampa ta emituje światło monochromatyczne o barwie żółtopomarańczowej. Bardzo dobrze widoczne są w ich świetle kontury przedmiotów. Światło to doskonale przenika przez mgłę. Oddawanie barw przedmiotów oświetlanych przez te lampy jest bardzo złe. Praktycznie wszystkie przedmioty, niezależnie od ich naturalnej barwy, są żółtoszare. Wyjątkiem jest tylko barwa czerwona, która jest najmniej zniekształcana. W związku z tym nie nadają się one do oświetlania wnętrz. Skuteczność świetlna tych lamp jest największa ze wszystkich sztucznych źródeł światła, a trwałość jest rzędu 12 000 godzin. Pełny strumień świetlny uzyskuje się po upływie od 7 do 15 minut od momentu podania impulsu zapłonowego. Ponowny zapłon lampy, po jej zgaśnięciu, w zależności od typu jest natychmiastowy lub po około 2 minutach. W związku ze swoimi właściwościami znajdują one powszechne zastosowanie głównie w oświetleniu zewnętrznym, np. dróg, autostrad, mostów, skrzyżowań itp.

W przypadku oświetlenia sztucznego oprócz parametru natężenia oświetlenia ważnym czynnikiem jest parametr określający wierne odwzorowanie barw.

Wskaźnik oddawania barw CRI (ang. *Colour Rendering Index*) określa w jakim stopniu dane źródło światła dobrze odwzorowuje kolory. Wskaźnik wyrażany jest w postaci liczbowej w zakresie od 0 do 100. Wartość 0 dotyczy światła jednobarwnego (monochromatycznego),

czyli pojedynczej długości fali elektromagnetycznej z zakresu widzialnego (380 nm – 760 nm). Najwyższa możliwa wartość wskaźnika oddawania barw 100 dotyczy światła białego o ciągłym widmie, czyli światła dziennego. Współczynnik CRI ma nie tylko znaczenie przy wykonywaniu pracy, w których wierne odwzorowanie kolorów odgrywa znaczącą rolę. Wartość współczynnika CRI wpływa także na samopoczucie i psychikę człowieka. W pomieszczeniu, w którym mamy do czynienia z oświetleniem o niskim współczynniku oddawania barw możemy gorzej się czuć, ponieważ nienaturalnie oświetlone przedmioty sprawiają, że nasze oczy szybciej się męczą. Wraz ze wzrostem wartości wskaźnika kolory przedmiotów są lepiej oddawane i wyglądają naturalniej. Niskie wartości CRI danego źródła światła oświetlenia sprawiają, że kolory wydają się wyblakłe, a w wyjątkowych przypadkach są widoczne jako czarne.

Spośród powszechnie znanych i stosowanych źródeł światła najniższym wskaźnikiem oddawania barw CRI charakteryzują się lampy sodowe niskoprężne, natomiast najczęściej spotykane w oświetleniu ulicznym lampy sodowe wysokoprężne zapewniają oddawanie barw na poziomie od 20 do 30. Zewnętrzne lampy LED zapewniają CRI na poziomie 70 lub więcej.

W zastosowaniach edukacyjnych, biurowych często spotyka się świetlówki oznaczone kodami 740 lub 840, co oznacza, że zapewniają one światło o wartości wskaźnika CRI 70+ oraz 80+. W przypadku takiego zastosowania świetlówek LED najmniejszą spotykaną wartością wskaźnika oddawania barw jest 80+. Dostępne są także diody LED o wskaźniku oddawania barw 90+, a nawet specjalne moduły z CRI 95+.

Ważnym parametrem określającym barwę światła białego jest temperatura barwowa światła. Parametr ten nie uwzględnia jasności świecenia. Jednostką jest Kelwin [K]. Zgodnie z normą PN-EN 12464-1 dotyczącą oświetlenia miejsc pracy we wnętrzach, dla źródeł zapewniających białą barwę światła wyróżnia się trzy grupy temperatury barwowej światła: ciepła, neutralna i zimna. Barwa biała ciepła jest to temperatura barwowa poniżej 3300 K. Diody o tej barwie posiadają zbliżoną temperaturę barwową do światła, jakie zapewnia klasyczna żarówka. Lampy LED potrafią idealnie zastąpić stare, energochłonne źródła światła. Neutralna barwa światła to temperatura barwowa z zakresu od 3300 K do 5300 K, jest to barwa najczęściej stosowana w przypadku świetlówek fluorescencyjnych. W przypadku diod zakres temperatury barwowej bywa zazwyczaj węższy i wynosi od 3800 do 4200 K lub od 4000 do 4500 K. Światło w barwie neutralnej jest najbardziej zbliżone do czystego białego światła, idealnie sprawdza się we wszelkiego typu sklepach oraz lokalach usługowych. Barwa biała zimna to temperatura barwowa powyżej 5300 K. Jest to światło chłodno-białe, ale w przypadku diod

elektroluminescencyjnych zapewnia ono większą ilość światła, niż barwy cieplejsze, dlatego jest szczególnie polecana w zastosowaniach zewnętrznych oraz tam, gdzie najważniejsza jest możliwie największa ilość światła, przy jak najniższym zużyciu energii.

Dodatkowo norma PN-EN 12464-1 (Światło i oświetlenie, Oświetlenie miejsc pracy, Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach) zawiera wymagania dotyczące temperatury barwowej w zależności od wartości średniego natężenia oświetlenia. Zależność ta jest podyktowana zapewnieniem odpowiedniego komfortu pracy i użytkowania pomieszczeń oświetlanych sztucznymi źródłami światła. Określa, że wraz ze wzrostem średniego natężenia oświetlenia, powinna wzrastać także temperatura barwowa źródła. Tabela 2.3 przedstawia wymagania dotyczące temperatury barwowej i odpowiadającej jej barwie światła dla odpowiednich wartości natężenia oświetlenia.

Tabela 2.3. Średnie natężenie oświetlenia na powierzchni roboczej

*Źródło: [opracowanie własne na podstawie normy PN-EN 12464-1]*

Natężenie oświetlenia [lux]	Temperatura barwowa [K]	Barwa światła
< 300	< 3300	Ciepła
300 ÷ 750	3300 ÷ 5300	Neutralna
> 750	> 5300	Zimna

## 2.2.6. Czynniki wpływające na dostępność światła dziennego w pomieszczeniach

Ilość docierającego światła dziennego do pomieszczenia jest uzależniona od wielu czynników, które determinują rodzaj stosowanego oświetlenia sztucznego oraz urządzeń sterujących tym oświetleniem. Pierwszym, oczywistym, ale bardzo ważnym czynnikiem jest położenie Słońca na nieboskłonie. Istnieje możliwość wyznaczenia położenia Słońca na nieboskłonie z wykorzystaniem układu współrzędnych horyzontalnych. Do tego celu wymagane jest określenie azymutu Słońca oraz wysokości Słońca nad horyzontem. Rysunek 2.3 przedstawia układ współrzędnych horyzontalnych z oznaczonymi kątami wymaganymi do określenia położenia Słońca na nieboskłonie. Jeśli znane są wartości tych kątów, to możliwe jest obliczenie kąta padania promieniowania słonecznego na dowolnie zorientowaną płaszczyznę. Według Kitlera i Daruli, nawet w przypadku całkowicie zachmurzonego nieba, natężenie oświetlenia w głównej mierze zależy od wysokości Słońca w ciągu dnia oraz przepuszczalności i grubości warstwy chmur [30]. Dane związane z parametrami położenia Słońca mogą także posłużyć do określania parametrów sterownia

oświetleniem poprzez wprowadzenie odpowiednich wartości do urządzeń sterujących elementami wykonawczymi w obwodach oświetleniowych.



Rys. 2.3. Kąty wyznaczające położenie Słońca względem obserwatora:  $\tau$  – kąt zenitalny,  $\alpha$  – kąt wzniesienia Słońca,  $\gamma$  – kąt azymutalny Słońca

*Źródło: [opracowanie własne wg [26]]*

Drugim bardzo ważnym czynnikiem potrzebnym do analizy dostępności światła dziennego w pomieszczeniu jest położenie geograficzne danego obiektu. Lokalizacja ta jest standardowo określana poprzez długość i szerokość geograficzną miejsca, w którym znajduje się obiekt. Przy określaniu dostępności promieniowania słonecznego istotna jest szerokość geograficzna  $\phi$ . Jest to inaczej położenie kątowe danej lokalizacji obiektu względem równika. Powierzchnie ścian obiektów posiadają różne kąty nachylenia w stosunku do poziomym. Do opisu położenia danej powierzchni (np. budynku) względem Słońca, służą następujące parametry [26]:

- kąt azymutalny powierzchni  $\gamma$ , zawarty między płaszczyzną normalną do analizowanej powierzchni, na którą pada promieniowanie słoneczne, a płaszczyzną miejscowego południka  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$  (wartości ujemne na wschód, a dodatnie na zachód), na południe  $\gamma = 0$ ;
- kąt nachylenia powierzchni względem poziomym  $\beta$ , który jest zawarty pomiędzy daną powierzchnią, a płaszczyzną poziomą Ziemi,  $0 \leq \beta \leq 180^\circ$  ;
- kąt padania promieniowania na powierzchnię pochyloną  $\theta$  (lub  $\theta_t$ ), który jest zawarty pomiędzy kierunkiem promieniowania bezpośredniego na daną powierzchnię, a normalną do tej powierzchni.

Trzecim istotnym czynnikiem decydującym o dostępności światła dziennego w pomieszczeniu jest położenie bryły obiektu względem stron świata – rozmieszczenie pomieszczeń. Kwestia lokalizacji budynku względem stron świata często jest traktowana marginalnie, a jej znaczenie użytkownicy uświadamiają sobie dopiero na etapie eksploatacji,



mieszkania. Okazuje się, że usytuowanie budynku, a zarazem pomieszczeń względem stron świata ma istotny wpływ na temperaturę wewnętrzną, a co się z tym wiąże przekłada się to na efektywność energetyczną [56]. Orientacja budynku, pomieszczeń ma jednak istotny wpływ na stopień doświetlenia wewnątrz światłem dziennym, a także w znaczącej mierze decyduje o funkcjonalności pomieszczeń. Dodatkowo odpowiednia regulacja poziomem wilgotności i temperaturą w obiekcie pozwala zachować zdrowy mikroklimat w budynku. Wszystkie te czynniki wpływają na codzienne samopoczucie mieszkańców lub pracowników podczas wykonywania pracy.

Kolejnym uwarunkowaniem, które ma wpływ na dostępność światła dziennego w pomieszczeniu jest konstrukcja i architektura budynku, w szczególności geometria budynku, elementy zadaszenia, wielkość otworów okiennych [59]. Znaczenie tego zagadnienia jest na tyle istotne, że prowadzone są specjalne symulacje pozwalające zaprojektować obiekt w taki sposób, aby zapewnić jak najkorzystniejsze doświetlenie pomieszczeń światłem dziennym. Symulacje komputerowe pomagają także w procesie modernizacji obiektów, szczególnie użyteczności publicznej, takich jak np. palcówki edukacyjne [85]. Dla określenia dostępności światła dziennego w pomieszczeniu z uwagi na konstrukcję budynku, rodzaj zamontowanych otworów okiennych, dachowych, zostały ustanowione geometryczne indeksy dostępności światła dziennego. Zasady obliczeń tych indeksów określa norma PN-EN 15193. Wynika z niej, że dostarczanie światła dziennego  $F_{DS}$  jest oceniane osobno dla pionowych elewacji i okien dachowych.

Dostarczanie światła dziennego do strefy, w której będzie ono wykorzystywane zależy od geometrycznych warunków brzegowych opisanych przez trzy kluczowe wskaźniki, indeksy:

- wskaźnik przejrzystości  $I_T$ ,
- wskaźnik głębokości  $I_{De}$ ,
- wskaźnik przeszkody  $I_O$ .

**Wskaźnik przejrzystości  $I_T$**  części budynku, która może korzystać z światła dziennego, jest określony wzorem:

$$I_T = \frac{A_C}{A_D} \quad [-] \quad (2.17)$$

gdzie:

$A_C$  – powierzchnia otworu elewacyjnego badanej przestrzeni [ $m^2$ ],

$A_D$  – całkowita powierzchnia poziomych płaszczyzn roboczych korzystających z naturalnego oświetlenia [ $m^2$ ],

### **Wskaźnik głębokości $I_{De}$**

Wskaźnik głębokości w normie jest nazywany także Indekssem głębi przestrzeni  $I_{De}$ , która może korzystać z oświetlenia naturalnego, jest określony przez zależność:

$$I_{De} = \frac{a_D}{H_{Li} - h_{Ta}} \quad (2.18)$$

gdzie:

$a_D$  – maksymalna głębokość strefy z dostępem światła dziennego [m],

$H_{Li}$  – wysokość nadproża nad podłogą [m],

$h_{Ta}$  – wysokość obszaru zadania (płaszczyzna odniesienia) od podłogi [m].

**Wskaźnik przeszkody  $I_O$**  uwzględnia efekty zmniejszające dostęp światła do budynku.

Do typowych takich przeszkód można zaliczyć:

- inne budynki i naturalne elementy krajobrazu, takie jak drzewa i góry;
- sam budynek, w tym proste projekty dziedzińca i atrium;
- poziome i pionowe zwisy dołączone do elewacji;
- przeszklone podwójne fasady.

Wszystkie te i inne parametry konstrukcji i architektury budynku odgrywają istotną rolę przy projektowaniu. Istnieją opracowania specjalizujące się w zagadnieniach projektowych obiektu ze szczególnym uwzględnieniem dostępu światła dziennego [11]. Bodart i De Herde zbadali wpływ położenia okna, jego wielkości, a także współczynnika przepuszczalności szyby oraz współczynników odbicia ściany wewnętrznej, na zużycie światła przy stosowaniu systemów kontroli światła dziennego. Autorzy dowiedli, że oświetlenie dzienne może zmniejszyć zużycie sztucznego oświetlenia z 50 do 80%. Globalna oszczędność energii pierwotnej wynika m.in. z rodzaju przeszkleń, które są zwykle stosowane w budynkach biurowych [18].

Kolejnym czynnikiem wpływającym na dostępność światła dziennego w pomieszczeniach jest otoczenie budynku. Zabudowa urbanistyczna, elementy architektury krajobrazu mogą powodować zacienienie i odbicia promieni słonecznych. Symulowanie dostępności światła dziennego w pomieszczeniach budynków staje się coraz ważniejszym zadaniem w celu osiągnięcia zrównoważonych i wysublimowanych projektów budowlanych. Problem ograniczenia dostępności światła dziennego spowodowany przez sąsiednią zabudowę mieszkaniową dotyczy szczególnie zabudowy miejskiej, gdzie światło dzienne dostępne dla budynku może być ograniczone, a znaczenie odbitego światła dziennego może stać się bardziej

znaczące [51]. Przeszkody w postaci roślinności, takiej jak drzewa i krzewy, mogą znacząco wpłynąć na dostępność światła dziennego w pomieszczeniach. W takim przypadku warto wykonać dokładne modelowanie, które pomaga uwzględnić dostępność światła dziennego w dłuższej perspektywie czasu [73].

Należy wspomnieć, że istnieje europejska norma EN 17037, zawiera wytyczne dla projektantów dotyczące wykorzystywania światła dziennego. Obejmuje ona cztery różne obszary dotyczące światła dziennego: dostarczanie światła dziennego, ocena widoku przez okna, dostępu do światła słonecznego i zapobieganie powstawaniu oślepienia. Z niniejszej normy można wywnioskować, że obliczanie dostępu do światła słonecznego lub ekspozycji na nie jest czynnikiem komfortu i zdrowia użytkowników mieszkań. Ilość światła dziennego można ustalić na podstawie szczegółowych obliczeń lub wartości tabelarycznych.

## **2.3. STEROWANIE OŚWIETLENIEM SZTUCZNYM WE WNEŹTRZACH**

### **2.3.1. Sposoby sterowania oświetleniem**

#### **2.3.1.1. Sterowanie typu załącz/wyłącz**

Podstawową możliwością sterowania oświetleniem jest sterowanie typu załącz/wyłącz. Sterowanie tego typu jest najprostszym i najbardziej powszechnym w użyciu rodzajem sterowania. W tym układzie mamy do czynienia jedynie z dwoma stanami pracy, czyli oświetlenie załączone 1/on lub wyłączone 0/off. Realizacja tych stanów może być wykonana manualnie poprzez wyłączniki bistabilne oraz za pomocą automatyki (wyłączniki monostabilne, sensory), które poprzez elementy wykonawcze dokonują załączenia bądź wyłączenia obwodów oświetleniowych. Dwa stany pracy tego układu sprawiają, iż jest to najprostszy, podstawowy i najpowszechniej stosowany sposób sterowania instalacjami, w tym także oświetleniem. Dotyczy to głównie instalacji tradycyjnych, starszego typu. W coraz powszechniej stosowanych inteligentnych systemach sterowania, stosuje się sensory monostabilne. Łatwość sterowania, szybkość działania oraz wysoka niezawodność, to dwie najważniejsze cechy tego typu sterowania. Pojedyncze wyłączniki, o różnych stopniach złożoności i zaawansowania technicznego, można podzielić na ze względu na różne kategorie zastosowania:

- sterowane ręcznie (wyłączniki monostabilne i bistabilne);
- obsługiwane ręcznie, bezprzewodowo za pomocą pilota wyłączniki na podczerwień IR;

- obsługiwane ręcznie lub za pomocą nadajników automatycznych, wyłączniki sterowane za pomocą fal radiowych (Wi-Fi);
- sterowanie poprzez wewnętrzną, magistralę systemową połączoną z centralnym systemem sterowania np. KNX.

System KNX umożliwia sterowanie oświetleniem (załącz/wyłącz i ściemnij/rozjaśnij), które jest realizowane za pomocą aktorów załączających i załączająco-ściemniających. Urządzenia te otrzymują polecenie, telegram, z elementu inicjującego, tj. sensor, czujnik PIR i dokonują załączenia obwodu oświetleniowego w danym kanale. Bardziej szczegółowo zostało to opisane w punkcie 2.3.2 niniejszej rozprawy. Do realizacji tego typu sterowania potrzebny jest tylko przełącznik lub urządzenie załączające i wyłączające sterowany obwód. W takim układzie sterowania istotnym parametrem jest moc źródeł światła, która determinuje dobór odpowiednich parametrów styków urządzenia sterującego. W sterowaniu oświetleniem coraz częściej odchodzi się od sterowania typu załącz/ wyłącz. Lepszym rozwiązaniem jest sterowanie typu ściemnij/rozjaśnij, które umożliwia załączanie i wyłączanie światła w sposób płynny. Z punktu widzenia użytkownika, sterowanie tego typu zapewnia płynną regulację natężenia oświetlenia sztucznych źródeł światła i co także ważne, wprowadza oszczędności w zużyciu energii elektrycznej. Przekłada się to także na żywotność źródeł oświetlenia sztucznego oraz elementów sterujących, unikając znacznych wartości prądów wyłączeniowych i złączeniowych. Popularność systemu sterowania oświetleniem typu on/off wynika głównie z jego prostoty. Przy realizacji takiego sterowania w systemie zdalnym, bezprzewodowym, wysyłane sygnały, komunikaty ograniczone są do zaledwie dwóch stanów informacji. Umożliwia to stosowanie prostych i niedrogich urządzeń wykonujących załączenie lub wyłączenie opraw oświetleniowych.

#### **2.3.1.2. Sterowanie typu ściemnij/rozjaśnij**

Drugim sposobem sterowania oświetleniem jest sterowanie typu ściemnij/rozjaśnij. Ten rodzaj sterowania umożliwia oprócz załączania i wyłączania także płynną regulację natężenia oświetlenia źródeł oświetleniowych. Sterowanie typu ściemnij/rozjaśnij funkcjonuje od bardzo dawna. Na początku miało na celu głównie zmniejszenie natężenie oświetlenia sztucznego. Kwestie oszczędności zużycia energii elektrycznej były na drugim planie. Zastosowanie tego typu sterowania oświetleniem wiąże się z zastosowaniem specjalnych wyłączników wyposażonych w układ ograniczenia przepływu prądu lub automatyki umożliwiającej regulację natężenia oświetlenia. Pierwsze, powszechnie stosowane do dzisiaj układy, umożliwiają płynną

zmianę natężenia oświetlenia, poprzez ręczną regulację potencjometrem. Systemy automatyki budynkowej, takie jak np. KNX, mają także możliwość ustawienia odpowiedniego natężenia oświetlenia sztucznego dla różnych wariantów scen. W zależności od sytuacji, godziny i innych czynników, natężenie oświetlenia może automatycznie się ustawiać w zależności od zdefiniowanych parametrów natężenia. Do zalet tego typu sterowania oświetleniem zaliczamy zmniejszenie zużycia energii, polepszenie komfortu użytkownika pomieszczeń oraz brak skokowych wartości natężenia oświetlenia sztucznego przy załączaniu i wyłączaniu [130]. Zalety te decydują o coraz bardziej powszechnym stosowaniu tego rodzaju sterowania.

### **2.3.1.3. Sterowanie z wykorzystaniem światła dziennego**

Systemy sterowania oświetleniem wykorzystujące światło dzienne należą do najbardziej efektywnych rozwiązań, które wpływają na poprawę efektywności budynków i wprowadzają oszczędności w zużyciu energii elektrycznej zużywanej na oświetlenie i systemy klimatyzacyjne [41]. Amerykańscy naukowcy przeprowadzili analizę dla średnich budynków biurowych w różnym wieku stojących w sześciu różnych lokalizacjach w Stanach Zjednoczonych. Uzyskane wyniki pokazują, że różne wersje sterowania umożliwiły oszczędność energii chłodzącej do 40% przy zastosowaniu cieniowania zewnętrznego i oszczędność energii w instalacjach oświetleniowych sięgającą do 25% [65].

Wspomniana norma PN-EN 12464-1:2022 wymaga takiego zaprojektowania oświetlenia, aby wymagania oświetleniowe określone dla danego zadania wzrokowego lub przestrzeni, mogły być zapewnione w sposób jak najbardziej efektywny energetycznie. Należy przy tym zwrócić uwagę, że ograniczenia zużycia energii elektrycznej nie mogą być realizowane kosztem obniżenia wymaganych parametrów oświetlenia [127]. Konieczne jest zatem zaprojektowanie i zastosowanie odpowiedniego systemu oświetlenia, osprzętu, układów sterowania oraz wykorzystania dostępnego światła dziennego, którego ilość zmienia się w ciągu dnia, zależnie od warunków pogodowych, klimatycznych. Ponieważ we wnętrzach, które posiadają okna, dostępność światła dziennego spada gwałtownie wraz z odległością od okien, konieczne jest zastosowanie sztucznego oświetlenia uzupełniającego. Dzięki temu zapewnia się osiągnięcie wymaganych poziomów natężenia oświetlenia na stanowisku pracy i możliwe jest uzyskanie równomierności rozkładu luminancji w pomieszczeniu. Osiągnięcie takiej równowagi oświetlenia ułatwia zastosowanie automatycznego systemu sterowania oświetleniem sztucznym, który zapewnia także właściwą integrację między oświetleniem sztucznym i oświetleniem dziennym.

Światło dzienne może być w pełni lub częściowo wykorzystane do oświetlenia zadań wzrokowych i dlatego jest źródłem potencjalnych możliwości oszczędności energii elektrycznej. Zgodnie z normą zadanie wzrokowe to zbiór elementów decydujących o postrzeganiu podczas wykonywania pracy, jak wymiary przedmiotu, jego luminancja, kontrast z tłem i czas trwania. Przeprowadzone badania [91] wykazały, że zastosowanie automatycznego systemu sterowania oświetleniem w obszarze pracy użytkownika pozwala na znaczne oszczędności w zużyciu energii elektrycznej w porównaniu ze sterowaniem ręcznym. Jednocześnie nie stwierdzono wpływu na komfort użytkowników ani na wydajność wykonywanych przez nich zadań.

## **2.3.2. Zastosowanie systemu KNX do inteligentnego sterowania oświetleniem**

### **2.3.2.1. Ogólna charakterystyka systemu**

System KNX jest standardem automatyki budynkowej opracowanym w 1990 roku. Instalacja wykorzystująca system KNX zasadniczo różni się w stosunku do tradycyjnej instalacji elektrycznej, szczególnie w zakresie konfiguracji łączników (sensory) i urządzeń wykonawczych (np. aktory, wyrobniki). Wyłączniki nie łączą bezpośrednio obwodów swoimi zestykami, lecz wysyłają informację przewodem magistralnym do urządzeń wykonawczych, znajdujących się najczęściej w rozdzielni. Tam następuje sterowanie obwodami poprzez zestyki przekaźników umieszczonych w wyrobnikach. Takie rozwiązanie pozwala na dowolne kształtowanie funkcjonalności instalacji elektrycznej. Ważną cechą systemu jest jego otwartość rozumiana jako możliwość włączania do instalacji urządzeń różnych producentów zrzeszonych w Międzynarodowym Stowarzyszeniu KNX. Europejski Komitet Normalizacyjny *CEN* w 2006 roku przyjął standard KNX, co sformalizowano w normach EN 13321-1 oraz EN13321-2. Obecnie obowiązująca wersja tych dokumentów pochodzi z 2021 roku [98]. Określono w nich wspólne zasady dla grupy systemów z magistralą ogólnego zastosowania, w których funkcje są zdecentralizowane i połączone poprzez wspólne procesy wymiany informacji. Zasady te określono zarówno dla domowych i budynkowych systemów elektronicznych (HBES), jak i automatyzacji budynków i zastosowania systemów sterowania i zarządzania budynkami (BACS). Wraz z rozwojem technologicznym stosowane są coraz bardziej zaawansowane systemy automatyki budynkowej, które mogą w znaczący sposób przyczynić się do oszczędności energii elektrycznej, w konsekwencji do poprawy efektywności energetycznej obiektów.

System KNX posiada strukturę rozproszoną, w której można wyodrębnić urządzenia systemowe, wykonawcze i sensory. Elementy systemu są połączone ze sobą specjalnym przewodem magistralnym, który zapewnia zasilanie urządzeń oraz przesyłanie informacji sterujących. Jest to zasadnicza różnica w odniesieniu do instalacji klasycznej, w której wszystkie elementy są połączone obwodami napięciowymi, a sterowanie odbiornikami, realizowane jest za pomocą odpowiedniej konfiguracji połączeń. Istotną cechą systemu KNX (także innych systemów stosowanych w budynkach inteligentnych) jest możliwość zwiększenia efektywności energetycznej budynków poprzez wykorzystanie właściwości systemu:

- monitorowanie zużycia energii na poziomie danej funkcji, zamiast tylko całościowo dla całej instalacji;
- pełną integrację, współdziałanie różnych systemów i instalacji w budynku, tj. oświetlenie, ogrzewanie czy chłodzenie;
- lepsze dostosowanie i kontrolę urządzeń sterujących do zewnętrznych warunków pogodowych (stacja pogodowa, czujniki natężenia oświetlenia itp.);
- indywidualne sterowanie instalacją w pomieszczeniach lub częściach budynku (zamiast centralnego sterowania);
- wielozadaniowe wykorzystanie poszczególnych elementów systemu, np. czujnik ruchu, pozwala jednocześnie na sterowanie oświetleniem, ale także ma wpływ na sterowanie ogrzewaniem czy chłodzeniem w pomieszczeniu; może także być zintegrowany z czujnikiem natężenia oświetlenia;
- zastosowanie odpowiednich algorytmów sterowania urządzeniami wykonawczymi, np. sekcjami oświetleniowymi w rozbudowanych instalacjach, umożliwia niezależne definiowanie parametrów oświetlenia w zależności od wartości lokalnych parametrów z czujników zainstalowanych w wybranym obszarze.

### **2.3.2.2. Zasada działania systemu KNX**

Podstawową częścią architektury KNX jest linia, do której można przyłączyć maksymalnie 255 urządzeń końcowych oraz sprzęgło liniowe, czyli łącznie 256 urządzeń. Linie tworzą obszary, które mogą zawierać do 15 linii. Taki podział systemu porządkuje strukturę, ułatwia konfigurację i zarządzanie nim, zwłaszcza w układach rozbudowanych, np. wielopoziomowych budynkach użyteczności publicznej lub mieszkaniowych. We wspomnianej powyżej topologii w jednym obszarze może pracować ponad 4000 urządzeń, co wskazuje na możliwości wykorzystania systemu w bardzo dużych obiektach. Dalsza jego rozbudowa jest możliwa poprzez zastosowanie sprzęgieł obszarowych. Możliwości sterowania poszczególnymi

urządzeniami wynikają z zastosowanego standardu wykorzystującego: adresowanie, które pozwala na lokalizację konkretnego urządzenia w rozbudowanych topologiach oraz wykorzystanie tzw. telegramów (ciągu bitów o ustandaryzowanej strukturze) zawierających polecenia sterujące, informacje o stanie urządzeń i czujników.

Każde urządzenie w systemie KNX zawiera układ mikroprocesorowy, który posiada zapisane dane konfiguracyjne potrzebne do realizacji sterowania. Zasilacz wraz z dławikiem służy do zasilania urządzeń systemu KNX, sensory odpowiadają za uruchomienie określonych obwodów poprzez aktory. Natomiast wyrobniki (aktory) otrzymują informacje z sensorów i innych urządzeń wysyłających komunikaty i realizują zawarte w telegramach zadania. Wszystkie ustawienia urządzeń w systemie KNX są programowane z użyciem dedykowanego narzędzia programistycznego. Funkcjonalności poszczególnych elementów systemu KNX zależą od producenta urządzenia. Przykładową topologię układu sterowania w systemie KNX, zawierającą elementy magistralne, wykonawcze i sensory, omówiono oraz przedstawiono w rozdziale 6.5 na rysunku 6.17.

### **2.3.2.3. Wykorzystanie systemu KNX do sterowania oświetleniem**

System KNX dzięki swojej strukturze i właściwościom pozwala między innymi na dowolną konfigurację różnych obwodów sterowania oświetleniem. W oprogramowaniu sterowania oświetleniem możemy definiować różne konfiguracje większej ilości obwodów oświetleniowych, tworząc sceny świetlne. Pod pojęciem sceny świetlnej rozumie się sposób oświetlania pomieszczeń realizowany przez załączenie i ustalenie określonej mocy źródeł światła, pojedynczo lub grupowo. Tworzenie takich konfiguracji pozwala za pomocą jednego przycisku, sensora, uruchamiać większą ilość opraw oświetleniowych o odpowiednio zdefiniowanych natężeniach oświetlenia, dzięki czemu można osiągnąć zamierzony przez projektanta efekt świetlny, np. nastrój, oświetlenie zgodne z normą w miejscach pracy, eksponowanie elementów architektury i wystroju wnętrz itp.

Realizacja sterowania oświetleniem może odbywać się w funkcji załącz/wyłącz i do tego celu wykorzystujemy aktory załączające. Natomiast funkcja ściemniania jest realizowana przez specjalne aktory ściemniające. Aktor ściemniający pełni także rolę aktora załączającego. Najwięcej możliwości regulacyjnych można uzyskać w instalacjach oświetleniowych, w których każda z opraw oświetleniowych posiada niezależny przewód zasilający.

Układ automatycznego sterowania oświetleniem wymaga opracowania odpowiedniego algorytmu, który opiera się na danych służących do odpowiedniego wygenerowania w układzie



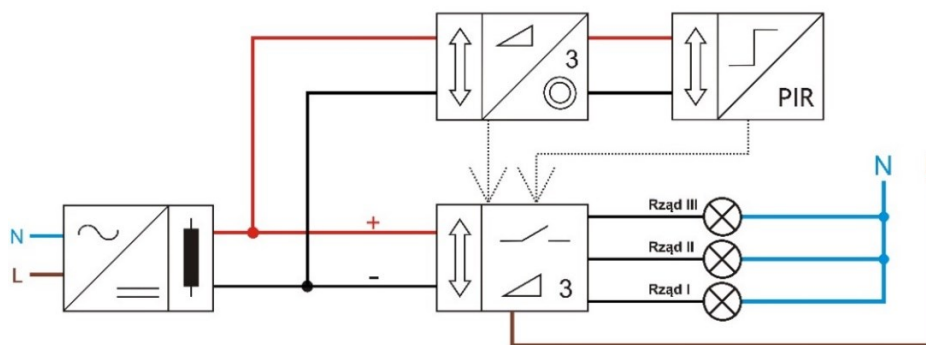
sterującym oświetleniem odpowiednich sygnałów sterujących. Implementacja każdego z układów sterowania zależy od ilości parametrów (ruch w pomieszczeniu, natężenia oświetlenia zewnętrznego, wewnętrznego) służących do uzyskania końcowego efektu regulacji oświetleniem w pomieszczeniu. Właściwie dobrany i zastosowany układ sterowania oświetleniem ma istotny wpływ na efektywność energetyczną instalacji oświetleniowych.

Wybrany system KNX pozwala na realizację założeń projektowych podanych w rozdziale 6.1 i zapewnia możliwość zastosowania w większości istniejących instalacji elektrycznych w nowoczesnym budownictwie. W podstawowym wykonaniu będzie składał się z elementów magistralnych, tj. zasilacz, elementów sterujących, tj. czujniki natężenia oświetlenia, ruchu i sensorów (przycisków załączających) oraz elementów wykonawczych, jak np. wyrobniki, aktory załączające czy też załączająco-ściemniające. Wartości natężenia oświetlenia, przy których mają być załączone obwody oświetleniowe będą definiowane programowo. Zasada działania takiego systemu sterowania polega na wysłaniu informacji (telegramu) do urządzenia wykonawczego, które steruje wybranym obwodem oświetleniowym. Komunikat zostaje wygenerowany po wcześniejszym porównaniu wartości zmierzonego przez czujnik natężenia oświetlenia z wcześniej zdefiniowanymi kryteriami. W przypadku, kiedy wartość natężenia światła dziennego w pomieszczeniu jest niewystarczająca system decyduje o załączeniu oświetlenia. Dodatkowo taki układ sterowania powinien być wyposażony w czujnik obecności PIR, który warunkuje załączenia oświetlenia przy obecności użytkownika w pomieszczeniu i jego wyłączeniu w przypadku nie wykrycia ruchu. Należy zauważyć, że implementacja odpowiednio dobranych algorytmów i systemów sterowania oświetleniem ma istotny wpływ na zmniejszenie zużycia energii elektrycznej, a tym samym przyczynia się do wzrostu efektywności energetycznej obiektu [115].

#### **2.3.2.4. Układ sterowania oświetleniem z wykorzystaniem czujnika ruchu**

Najprostszy układ sterowania oświetleniem w systemie KNX składa się z czujnika ruchu oraz elementu wykonawczego jakim jest aktor załączający. Ten podstawowy system sterowania będzie działał w przypadku wykrycia obecności użytkownika w pomieszczeniu. Załączenie oświetlenia nastąpi w chwili wykrycia ruchu pojawiającego się w zasięgu czujnika i jego wyłączenie w przypadku, kiedy użytkownika nie będzie w danym pomieszczeniu. Uproszczony schemat ideowy takiego układu sterowania przedstawiono na rysunku 2.4. Na schemacie przedstawiono sterowanie trzema rzędami opraw oświetleniowych, tak jak ma to miejsce w pomieszczeniu, w którym były przeprowadzane badania rozkładu natężenia oświetlenia.

Dla zapewnienia możliwości ręcznego, niezależnego sterowania oświetleniem układ wyposażono w sensor umożliwiający załączanie i wyłączanie oświetlenia, a także regulację jego natężeniem. Taki układ sterowania posiada podstawowe cechy automatyki i jest możliwy do zastosowania np. w pomieszczeniach, które nie posiadają dostępu światła dziennego. W przypadku pomieszczeń z dostępem światła zewnętrznego taki układ, aby był efektywny energetycznie, należy dodatkowo wyposażyć w czujnik natężenia oświetlenia.



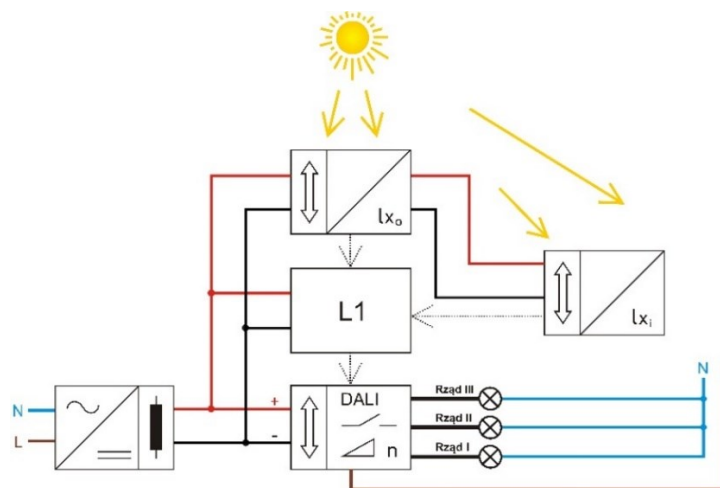
Rys. 2.4. Uproszczony schemat ideowy sterowania oświetleniem w systemie KNX z wykorzystaniem czujnika ruchu

Źródło: [opracowanie własne]

### 2.3.2.5. Układ sterowania oświetleniem z wykorzystaniem światła dziennego

System sterowania oświetleniem wykorzystujący światło dzienne składa się z następujących elementów: urządzeń pomiarowych ( $I_x$ ), decyzyjnych (L) oraz wykonawczych (wyrobników WR itp.). Zadaniem urządzenia pomiarowego jest bieżący odczyt wartości natężenia światła dziennego. Najprostszy tego typu układ sterowania powinien zawierać przynajmniej jeden czujnik natężenia oświetlenia. Czujnik ten powinien zostać umieszczony wewnątrz pomieszczenia. Wewnętrzna instalacja czujnika pomiarowego wynika z konieczności pomiaru natężenia oświetlenia w miejscu, w którym musimy zapewniać jego odpowiednią wartość. Wobec tego układ sterowania oświetleniem sztucznym będzie w odpowiedni sposób reagował na natężenie światła dziennego. W zaawansowanym rozwiązaniu takiego układu sterowania w systemie KNX należy zastosować urządzenie magistralne (zasilacz), sensory w postaci czujnika natężenia oświetlenia umieszczonego wewnątrz ( $I_{x_i}$ ), na zewnątrz ( $I_{x_o}$ ), elementu decyzyjnego, sterującego (L) oraz elementów wykonawczych, tj. aktryory załączające, ściemniające czy też bramki DALI.

Na rysunku 2.5. przedstawiono uproszczony, ideowy schemat sterowania oświetleniem w systemie KNX z wykorzystaniem światła dziennego. Zastosowano dwa czujniki natężenia oświetlenia zarówno wewnątrz pomieszczenia jak i na zewnątrz.



Rys. 2.5. Uproszczony schemat ideowy sterowania oświetleniem w systemie KNX z wykorzystaniem dwóch czujników natężenia oświetlenia oraz sterownika DALI

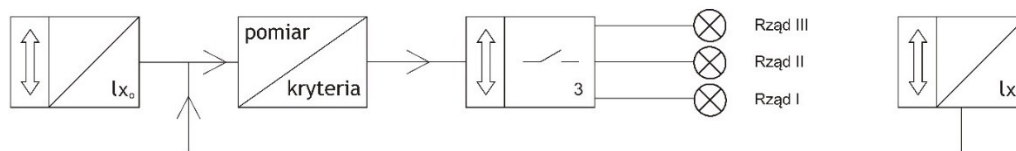
*Źródło: [opracowanie własne]*

W przedstawionym układzie sterowania zastosowano sterownik DALI, który umożliwia niezależne sterowanie poszczególnymi obwodami oświetleniowymi. W praktyce zastępuje on 3-kanałowy aktor załączająco-ściemniający. W tym przypadku schemat także odnosi się do sterowania oświetleniem w pomieszczeniu, w którym dokonywano pomiarów i badań. Z uwagi na polepszenie przejrzystości schematu nie ujęto czujnika ruchu PIR, którego zastosowanie jest oczywiste, a włączenie do układu sterowania, bardzo proste.

### 2.3.2.6. Układy sterowania oświetleniem w systemie KNX

Sterowanie oświetleniem w systemie KNX jest programowane cyfrowo, a jego złożoność zależy m.in. od rodzaju wykorzystanych urządzeń i elementów w układzie sterowania. Przedstawione powyżej sposoby sterowania oświetleniem w systemie KNX zakładają różny stopień skomplikowania systemu sterowania. Najprostszy z nich wykorzystuje tylko czujnik ruchu, który jest jedynym źródłem informacji wpływającym na załączanie i wyłączanie oświetlenia. W tym układzie nie możemy automatycznie sterować natężeniem oświetlenia sztucznego, ani też odpowiednimi rzędami lamp, ponieważ nie mamy odpowiednich i niezbędnych do takiego sterowania informacji. Stosując czujnik natężenia oświetlenia można zastosować system sterowania, który będzie dopasowywał moc opraw oświetleniowych do wartości natężenia światła dziennego. Ze względu na stosunkowo niewielkie koszty czujników

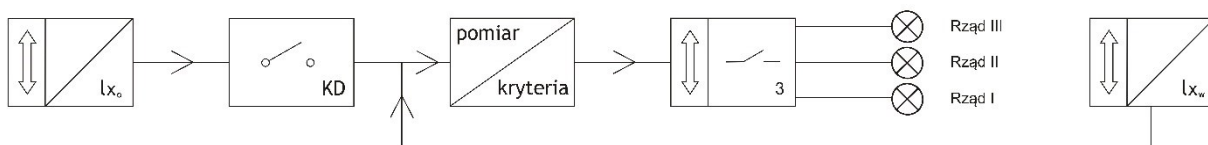
natężenia oświetlenia, pierwotnie zaproponowano zastosowanie dwóch czujników, dokonujących pomiaru natężenia światła na zewnątrz i wewnątrz pomieszczenia. Jak pokazały przeprowadzone badania, wprowadza to poprawę skuteczności sterowania oświetleniem i eliminuje ewentualne zakłócenia, które mogą powstawać w chwili dokonywania pomiaru. Układ wykorzystujący dwa czujniki natężenia światła,  $lx_o$  oraz  $lx_i$ , przedstawiono na rysunku 2.6. Schemat przedstawia sterowanie trzema rzędami opraw oświetleniowych przy wykorzystaniu 3-kanalowego wyrobnika załączającego. Na rysunku 2.5 został przedstawiony układ wykorzystujący czujniki natężenia oświetlenia w wielokanałowym systemie DALI. Na potrzeby realizacji badań opracowano układ sterujący oświetleniem wykorzystujący jeden czujnik natężenia oświetlenia, co zostało przedstawione w rozdziale 6.2.



Rys. 2.6. Schemat ideowy układu sterowania oświetleniem w systemie KNX z wykorzystaniem czujników natężenia oświetlenia i układu sterującego zawierającego określone progowe wartości graniczne

*Źródło: [opracowanie własne]*

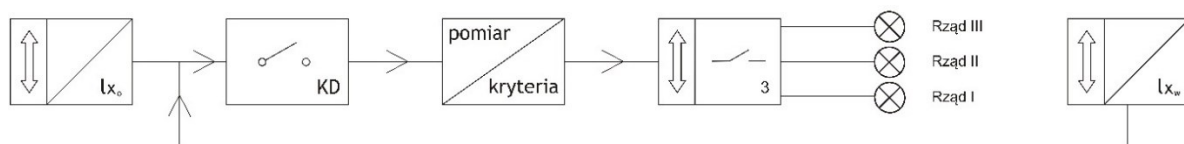
W przypadku, kiedy chcemy, aby do sterowania oświetleniem sztucznym wykorzystywany był tylko sygnał pochodzący z czujnika wewnętrznego, to konieczne jest zastosowanie kontrolera decyzyjnego KD, który spowoduje, że pomiar z czujnika zewnętrznego  $lx_o$ , nie będzie brany pod uwagę w procesie sterowania oświetleniem. Kontroler decyzyjny jest elementem układu sterującego, współpracującego z układem wykonawczym systemu KNX. Tak jak we wszystkich przedstawionych układach sterowania, również w tym, istnieje możliwość sterowania oświetleniem sztucznym wg z góry ustalonych kryteriów. Tymi kryteriami są wartości natężenia oświetlenia. Opisana koncepcja sterowania została przedstawiona w postaci uproszczonego schematu blokowego na rysunku 2.7.



Rys. 2.7. Schemat ideowy układu sterowania oświetleniem w systemie KNX z wykorzystaniem czujnika zewnętrznego i wewnętrznego natężenia oświetlenia oraz układu sterującego zawierającego określone progowe wartości graniczne

*Źródło: [opracowanie własne]*

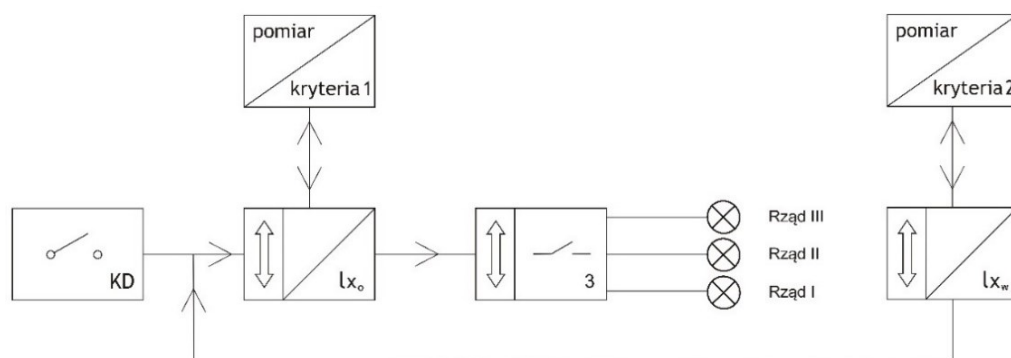
W niektórych przypadkach istnieje konieczność zdecydowania, który z pomiarów natężenia światła (zewnątrzny czy wewnętrzny), ma zostać wykorzystany do załączenia sterowania oświetleniem. Wówczas należy zastosować układ sterowania bazujący na schemacie ideowym przedstawionym na rysunku 2.8. W tej sytuacji kontroler KD zdecyduje, czy wartość natężenia światła z czujnika wewnętrznego czy zewnętrznego ma sterować obwodami oświetleniowymi. W praktyce okazuje się, że ten sposób sterowania sprawdza się np. w przypadku, kiedy jeden z czujników jest uszkodzony lub przekazuje pomierzone wartości wynikające z chwilowych lub dłuższych zakłóceń (przysłonięcia, dodatkowe inne źródła światła). Może to znaleźć zastosowanie w sterowaniu oświetleniem pomieszczeń, w których występują przeszkody w dostępie światła dziennego i dane pochodzące tylko z jednego czujnika natężenia oświetlenia mogłyby być niewystarczające lub wprowadzające błędne informacje o natężeniu światła.



Rys. 2.8. Schemat ideowy układu sterowania oświetleniem w systemie KNX z wykorzystaniem czujnika zewnętrznego i wewnętrznego natężenia oświetlenia oraz układu sterującego zawierającym określone progowe wartości graniczne

Źródło: [opracowanie własne]

W celu zwiększenia niezawodności i dokładności sterowania oświetleniem, można zastosować wielokryterialny układ sterowania. Jego działanie polega na niezależnym odczycie wartości natężenia oświetlenia zewnętrznego i wewnętrznego i porównaniu ich z założonymi, przyjętymi kryteriami wartości natężenia światła. Takie rozwiązanie można z powodzeniem zastosować w przypadku, kiedy załączone oświetlenie sztuczne nie będzie miało wpływu na pomiar przez wewnętrzny czujnik natężenia oświetlenia. Należy wówczas brać pod uwagę pomiar natężenia światła wykonany przez czujnik zewnętrzny i odnieść go do założonych dla niego parametrów. Takie rozwiązanie zostało przedstawione na rysunku 2.9.



Rys. 2.9. Schemat ideowy układu sterowania oświetleniem w systemie KNX z wykorzystaniem czujnika zewnętrznego i wewnętrznego natężenia oświetlenia oraz niezależnych układów sterujących zawierającymi określone wartości graniczne

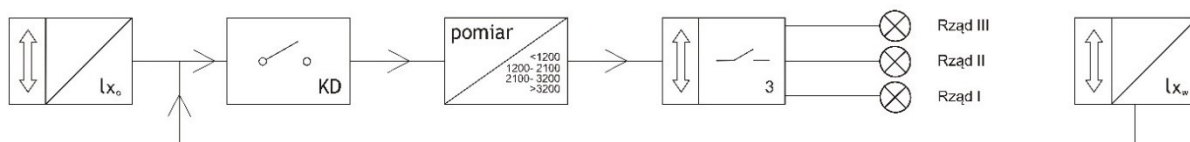
Źródło: [opracowanie własne]

Jednym z najbardziej zaawansowanych układów sterowania oświetleniem jest układ wykorzystujący wartości kryterialne do sterowania wybranymi rzędami opraw oświetleniowych. Zastosowanie takiego układu sterowania wymaga znajomości natężenia oświetlenia mierzonego przez czujnik zewnętrznego natężenia światła  $lx_o$ , dla którego w miejscach, gdzie zainstalowane są oprawy świetlne, natężenie światła jest wystarczające. Jeśli układ będzie wyposażony w drugi, wewnętrzny czujnik natężenia oświetlenia to kontroler decyzyjny KD pobierze w pierwszej kolejności dane z czujnika zewnętrznego  $lx_o$ . Czujnik będzie zatem wysyłał informacje o konieczności załączenia lub wyłączenia poszczególnych obwodów oświetleniowych zgodnie z ustalonymi wartościami granicznymi.

Rysunek 2.10 przedstawia uproszczony schemat ideowy układu sterowania oświetleniem, w którym zastosowane są dwa czujniki natężenia oświetlenia  $lx_o$  oraz  $lx_i$ , kontroler decyzyjny KD, moduł kryterialny z ustawionymi wartościami granicznymi natężenia oświetlenia zewnętrznego oraz element wykonawczy w postaci aktora (wyrobnika) załączającego poszczególne rzędy opraw oświetleniowych. Wszystkie przedstawione układy sterowania oświetleniem zostały opisane w artykule [128]. Algorytmy sterowania oświetleniem sztucznym bazujące na tych przedstawionych w rozdziale 2.3.2.6 mogą być wykorzystane do realizacji dodatkowych zadań, takich jak, zapewnienie całodobowego oświetlenia budynku [121].

Przedstawione na schematach ideowych od 2.6 do 2.10 układy sterowania mogą mieć zastosowanie w różnych obiektach i różnych konfiguracjach instalacji elektrycznych. Zastosowanie odpowiedniego układu sterowania jest zależne od wielu czynników determinujących właściwy wybór układu. Do najważniejszych z nich możemy zaliczyć:

- specyfikę użytkowania obiektu;
- usytuowanie i architekturę budynku;
- specyfikę istniejącej instalacji elektrycznej;
- stopień zaawansowania planowanego systemu sterowania;
- możliwości techniczne modernizacji i rozbudowy istniejącej instalacji;
- oczekiwany wzrost efektywności energetycznej instalacji oświetleniowej.



Rys. 2.10. Schemat ideowy układu sterowania oświetleniem w systemie KNX z wykorzystaniem czujnika zewnętrznego i wewnętrznego natężenia oświetlenia oraz układu sterującego z parametrami zawierającymi progowe wartości graniczne pochodzące z badań

*Źródło: [opracowanie własne]*

### 3. CEL I TEZA PRACY

**Podstawowym celem** niniejszej rozprawy jest opracowanie algorytmu sterowania oświetleniem, który zapewni spełnienie wymaganych parametrów oświetleniowych miejsc pracy wzrokowej w obiektach użyteczności publicznej, przy jednoczesnym, maksymalnym wykorzystaniu światła dziennego. Działanie takie powinno przynosić w rezultacie oszczędność w zużyciu energii elektrycznej, bez pogorszenia subiektywnych odczuć użytkowników.

Osiągnięcie podstawowego celu rozprawy wymagało rozwiązania dwóch zasadniczych problemów naukowych:

- opisanie z wykorzystaniem zależności matematycznych zmian rozkładu natężenia światła dziennego w pomieszczeniu w funkcji jego głębokości;
- wykonanie oraz zaimplementowanie układu i algorytmu sterowania oświetleniem sztucznym, które wykorzystując dane o rozkładzie natężenia światła dziennego w pomieszczeniu, pozwolą na osiągnięcie oszczędności w zużyciu energii w instalacjach oświetleniowych.

W celu rozwiązania pierwszego problemu naukowego należało uzyskać odpowiedzi na trzy zasadnicze pytania, których wyniki można było uzyskać tylko na drodze eksperymentu naukowego:

1. Jak zmienia się rozkład natężenie światła dziennego w pomieszczeniu w zależności od jego położenia względem stron świata?
2. Jaki jest wpływ warunków atmosferycznych na rozkład natężenia światła dziennego w pomieszczeniach?
3. Jaki jest wpływ położenia Słońca (pory roku) na rozkład natężenia światła dziennego w pomieszczeniach?

Natomiast rozwiązanie problemu drugiego wymagało uzyskania odpowiedzi na następujące dwa pytania:

1. W jaki sposób sterować źródłami oświetlenia sztucznego, aby uzyskać największą efektywność energetyczną w instalacjach oświetleniowych?
2. W jaki sposób sterować źródłami oświetlenia sztucznego, aby uzyskać możliwie jak najbardziej równomierne natężenia oświetlenia na całej powierzchni pomieszczenia?



Autor sformułował tezę pracy:

***„Efektywność energetyczną instalacji oświetleniowych można poprawić poprzez zastosowanie algorytmu sterowania wykorzystującego formuły matematyczne opisujące rozkłady natężenia oświetlenia wyznaczone przy użyciu matrycy fotometrycznej”.***

Teza pracy została udowodniona na drodze realizacji następujących zadań:

- ocena dostępności światła dziennego dla pomieszczeń badanego obiektu w zależności od ich położenia geograficznego i usytuowania względem stron świata oraz daty i godziny;
- opracowanie projektu i wykonanie układu matrycowego pomiaru natężenia oświetlenia w pomieszczeniach (matryca fotometryczna) oraz przeprowadzenie pomiarów natężenia światła dziennego w pomieszczeniach dydaktycznych, na podstawie których opracowano matematyczne zależności opisujące rozkłady natężenia oświetlenia w analizowanych pomieszczeniach;
- opracowanie algorytmów sterowania oświetleniem sztucznym zwiększających efektywność energetyczną w stosunku do układu bez sterowania;
- implementacja opracowanych algorytmów sterowania w standardzie KNX;
- analiza wpływu zaimplementowanego systemu sterowania oświetleniem na zmniejszenie zużycia energii w instalacjach oświetleniowych – poprawa efektywności energetycznej;
- analiza ekonomiczna zaimplementowanego systemu sterowania w kontekście uzyskanych oszczędności – szacowany czas zwrotu wdrożonego systemu.

#### 4. KONCEPCJA UKŁADU STEROWANIA OŚWIETLENIEM

Celem pracy było opracowanie algorytmu sterowania i zaprojektowanie układu sterowania oświetleniem, które zapewni wymagane natężenie oświetlenia na całej powierzchni pomieszczenia, wykorzystując paralelnie światło dzienne. Realizując taki układ zapewnia się wymagane natężenie oświetlenia w pomieszczeniu i jego równomierny rozkład przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia energii elektrycznej. W celu zapewnienia równomiernego, wymaganego natężenia oświetlenia w pomieszczeniu, konieczna jest wiedza o rozkładzie natężenia oświetlenia. Takich danych dostarcza matryca fotometryczna, która mierzy natężenie oświetlenia jednocześnie we wszystkich punktach pomiarowych w danym pomieszczeniu. Uzyskane wyniki wykorzystuje się w sterowaniu urządzeniami wykonawczymi obwodów sterujących oświetleniem. Dane dotyczące rozkładów natężenia oświetlenia są zapisane w pamięci urządzeń sterujących, które na podstawie bieżącego pomiaru natężenia oświetlenia w pomieszczeniu, odpowiednio regulują pracę poszczególnych źródeł oświetlenia. Pomiar natężenia oświetlenia jest dokonywany za pomocą jednego czujnika natężenia oświetlenia  $P_r$ , którego możliwości pomiarowe pozwalają na określenie wartości bieżącego natężenia oświetlenia eliminując m.in. natężenie oświetlenia sztucznego oraz błędy pochodzące z odbić promieniowania światła dziennego. Istotnym elementem w opracowaniu algorytmów sterowania jest ustalenie korelacji pomiędzy natężeniem oświetlenia pochodzącym z czujnika zainstalowanego w pomieszczeniu, a rozkładami natężenia oświetlenia zarejestrowanymi podczas pomiarów. Kalibracja systemu sterowania została wykonana w taki sposób, że podczas pomiarów z wykorzystaniem matrycy zostały jednocześnie wykonywane odczyty wartości natężenia oświetlenia z czujnika. Poprawność zależności mierzonych wartości za pomocą matrycy i czujnika sterującego układami regulacji oświetlenia, została potwierdzona dla różnych warunków pogodowych w różnym czasie.

## **5. BADANIA ROZKŁADU NATĘŻENIA OŚWIETLENIA**

### **5.1. WYBÓR METODY BADAWCZEJ**

Badania rozkładu natężenia oświetlenia możemy wykonać metodą obliczeniową albo metodą eksperymentalną drogą pomiarów. Metoda obliczeniowa wymaga posiadania danych niezbędnych do wykonania obliczeń. Takie dane można otrzymać z odpowiedniej literatury fachowej lub dokonując bezpośrednich pomiarów. Obliczenia najlepiej wykonuje się stosując modele matematyczne, z których korzystają specjalistyczne programy [95].

Do wykonania pomiarów potrzebujemy precyzyjnej aparatury, obiektu badań oraz osoby o odpowiednich kwalifikacjach, która będzie mogła dokonać rzetelnych pomiarów. Metoda eksperymentalna wymaga wcześniejszego i dokładnego przygotowania planu pomiarowego, co jest pewnego rodzaju trudnością przy jego realizacji. Należy wspomnieć, że wykonanie pomiarów zapewnia najdokładniejsze określenie warunków panujących w badanym pomieszczeniu. Z tego względu zdecydowano o wyborze metody eksperymentalnej.

W celu zapewnienia reprezentatywności wyników pochodzących z eksperymentu zdecydowano się na wykorzystanie autorskiej metody pomiarowej bazującej na bezprzewodowej matrycy fotometrycznej. Opracowana przez autora metoda pozwala na jednoczesny pomiar natężenia oświetlenia w 16 punktach z możliwością ciągłej akwizycji danych w czasie rzeczywistym. Pozwala ona na uniknięcie błędów pomiarowych charakterystycznych dla badania rozkładów natężenia oświetlenia metodą klasyczną bazującą na wykorzystaniu luksomierza ręcznego, umożliwiającego pomiar w jednym czasie tylko w jednym punkcie. Szczegółowy opis matrycy fotometrycznej, możliwości jej zastosowania oraz jej najważniejszych zalet przedstawiono w rozdziale 5.3.

### **5.2. MIEJSCE PROWADZENIA BADAŃ I IMPLEMENTACJI SYSTEMU STEROWANIA OŚWIETLENIEM**

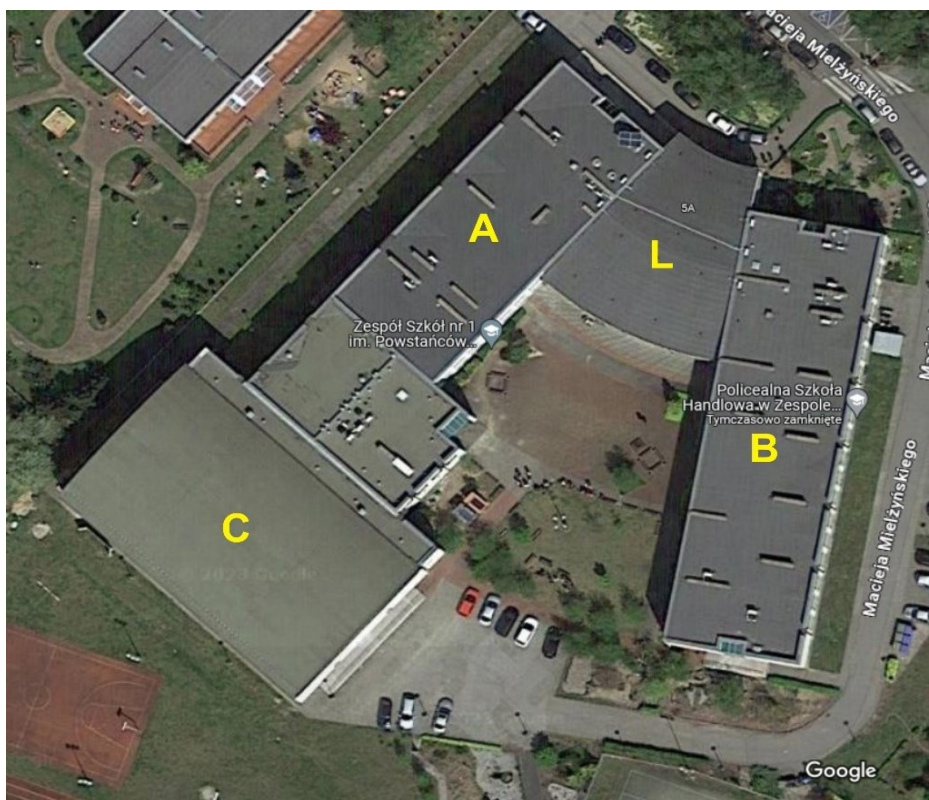
#### **5.2.1. Budynek i jego położenie w kontekście dostępności światła dziennego**

Obiektem badań w niniejszej pracy są pomieszczenia, sale wykładowe mieszczące się w budynku Zespołu Szkół nr 1 w Swarzędzu. Obiekt zlokalizowany jest w zachodniej części Polski, w województwie wielkopolskim, oddalonym 12 km od Poznania. Jest to budynek II kondygnacyjny, położony na szerokości  $52^{\circ}39'74''\text{N}$  i długości geograficznej  $17^{\circ}06'42''\text{E}$ .

Pomieszczenia te charakteryzują się specyficznym systemem pracy oraz zapewnieniem odpowiedniej, wymaganej wartości natężenia oświetlenia PN-EN 12464-1. Autor pracy zdecydował się na taki obiekt badań ze względu na dostępność pomieszczeń podczas wykonywania badań oraz dużą ilość podobnych obiektów w kraju i na świecie. Podczas wykonywania badań nie było potrzeby uwzględniania zacienienia, które mogło powstawać w wyniku przysłonięcia przez sąsiadujące budynki bądź elementy architektury krajobrazu, ponieważ pomieszczenia są usytuowane w miejscach z pełnym dostępem światła dziennego. W charakterystyce obiektu należy także uwzględnić sposób wykorzystania pomieszczeń oraz całego obiektu w poszczególnych okresach użytkowania.

Budynek Zespołu Szkół nr 1 w Swarzędzu jest obiektem wolnostojącym, składającym się z trzech skrzydeł ułożonych w kształcie litery U (rys. 5.1). Cały obiekt powstawał na przestrzeni 5 lat. Najstarsza część – skrzydło A oraz łącznik L zostały wybudowane w roku 2002 r. Dwa lata później powstało skrzydło B, a w roku 2006 część C wraz z salą gimnastyczną. W roku 2018 powstał nowy obiekt, jakim jest Centrum Kształcenia Zawodowego. Ze względu na swój odrębny charakter, nie został on wzięty pod uwagę w obliczeniach dotyczących zużycia energii elektrycznej. Formalnie posiada oddzielany układ zasilający i pomiarowy. Jak wspomniano, wokół całego budynku nie ma obiektów budowlanych oraz przeszkód architektury krajobrazu, które zacięniałyby pomieszczenia szkoły. Jedynie od strony wschodniej znajdują się dwa drzewa, które w niewielkim stopniu, w godzinach dopołudniowych, zacięniają jedno z pomieszczeń administracji. Można więc przyjąć, że poza tym wyjątkiem, budynek szkoły nie posiada przeszkód ograniczających dostęp światła dziennego do wnętrza pomieszczeń. Należy więc założyć, że ilość docierającego do pomieszczeń światła dziennego jest uzależniona ściśle od pory roku, dnia i warunków atmosferycznych.

Salę wykładowe znajdujące się w skrzydłach A i B, są położone od strony północnej (N) i południowej (S). Pomieszczenia administracji znajdują się głównie od strony wschodniej (E), natomiast hol główny, spełniający przede wszystkim funkcję komunikacyjną położony jest od strony zachodniej (W). Takie położenie sal dydaktycznych oraz pozostałych pomieszczeń względem stron świata będzie miało odzwierciedlenie w doborze algorytmu sterowania oświetleniem.



Rys. 5.1. Zdjęcie satelitarne obiektu szkoły w Swarzędzu

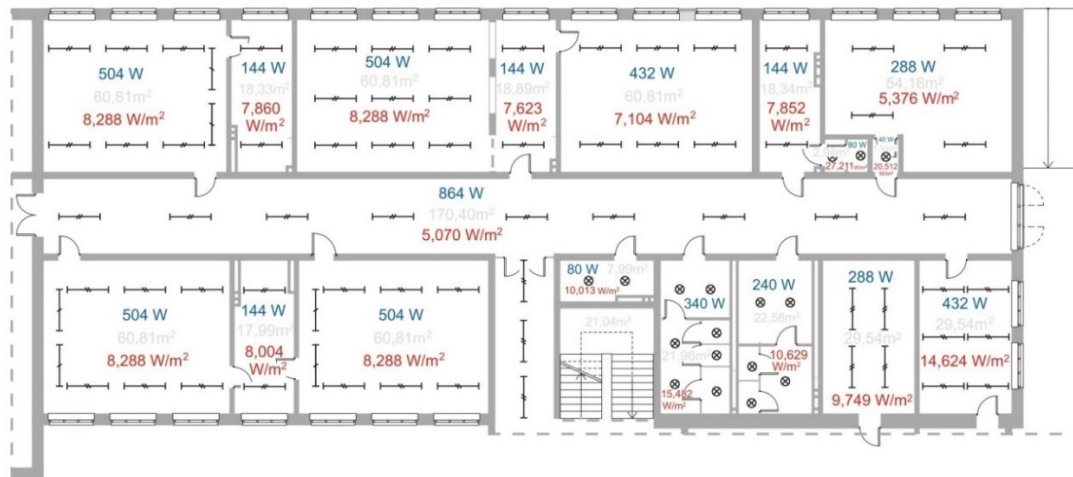
Źródło: [ <https://www.google.com/maps/place/Swarz%C4%99dz>, 12.09.2023r.]

### 5.2.2. Charakterystyka pomieszczeń z punktu widzenia wykonywanych badań

Część A budynku szkoły (rys. 5.2) zlokalizowana jest po przeciwnej stronie części B w odległości około 40 m. Pomiary natężenia oświetlenia wykonano w dwóch salach położonych w części B na I piętrze budynku szkoły (rys. 5.3). Orientacja jednej z sal jest skierowana w stronę południową (S), natomiast druga znajduje się na tym samym poziomie, lecz po przeciwnej stronie skrzydła i jej orientacja jest w kierunku północnym (N). Usytuowanie tych sal zostało oznaczone kolorem żółtym na rysunku 5.3. Pomieszczenia, w których przeprowadzono badania mają 8,7 szerokości i 7 m głębokości ( $59,5 \text{ m}^2$ ). O wyborze tych pomieszczeń dla celów badań i pomiarów, zdecydowała możliwość stałego dostępu. Wysokość wszystkich sal jest jednakowa i wynosi 3,52 m.

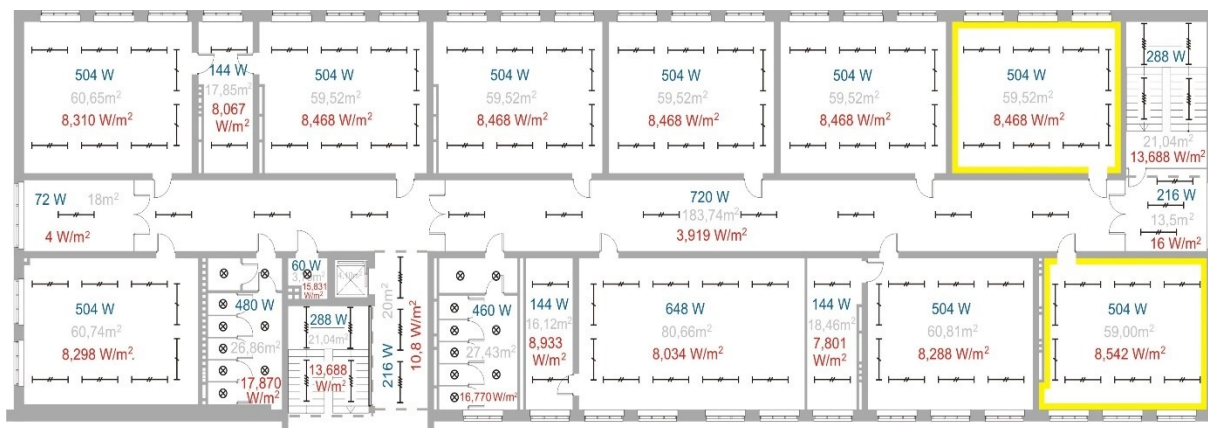
Okna mają szerokość 2,2 m i wysokość 2,4 m. Łączna powierzchnia wszystkich okien w sali to  $3 \times 5,28 \text{ m}^2$  czyli  $15,84 \text{ m}^2$ . Odległość między oknami wynosi 66 cm. Parapety znajdują się na wysokości 0,83 m nad podłogą. Równoległe do okien znajdują się trzy rzędy ławek szkolnych oraz trzy rzędy opraw oświetleniowych. Moc opraw oświetleniowych przypadająca na  $1 \text{ m}^2$  powierzchni pomieszczenia wynosi  $10,8 \text{ W/m}^2$ . Taka moc opraw zapewnia wymagane

natężenie oświetlenia (500 lux na powierzchni roboczej, za którą uważa się powierzchnię blatu ławki szkolnej znajdującą się na wysokości 75 cm), co w normie EN 12464-1 [83] klasyfikowane jest jako „dobre spełnienie wymagań”.



Rys. 5.2. Rzut parteru skrzydła A

Źródło: [opracowanie własne]

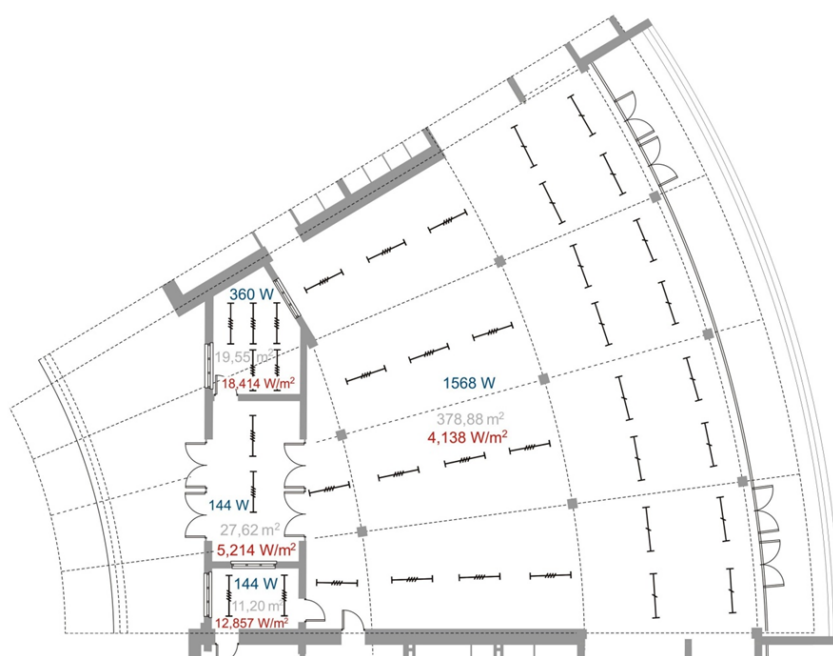


Rys. 5.3. Rzut piętra skrzydła B

Źródło: [opracowanie własne]

Dostęp światła dziennego do sal lekcyjnych, zarówno od strony południowej jak i północnej, nie jest utrudniony przez żadne zewnętrzne przeszkody. W pracy Robinsona i Selkwitza [105] autorzy prowadzili analizę dostępu światła dziennego w podobnie położonych i wyposażonych salach, które miały również zbliżoną geometrię. Do oceny średniego współczynnika odbicia światła dziennego, autorzy wspomnianego artykułu wykonali komputerową symulację, w której wykazano, że współczynnik przeszkody jest równy 1,

natomiast powierzchnia podłogi jest w całości zajęta przez krzesła i stoły o średnim współczynniku odbicia 40%. Ściany i sufit malowane były farbą emulsyjną, matową, koloru białego, co pozwala szacować ich współczynnik odbicia w zakresie 60-80%. Okna składają się z podwójnych szyb o współczynniku przepuszczalności światła 0,78. Tutaj również znajdujemy pełną analogię do miejsca, w których wykonywane były badania. Stosunek powierzchni okien do powierzchni podłogi w klasie wynosi 16%, co odpowiada wytycznym zawartym w pracy Reitera i DeHerde [103]. Stosunek całkowitej głębokości klasy do wysokości nadproża wynosi 3. Wymieniony współczynnik został szczegółowo zdefiniowany m.in. w pracy Reinharta [102]. Korzystając z powyższych artykułów możemy przyjąć dla badanych pomieszczeń podobne wartości współczynników, co staje się pomocne przy dodatkowych, przyszłościowych analizach i obliczeniach.



Rys. 5.4. Łącznik – rzut parteru (część łącząca skrzydło A z B)

Źródło: [opracowanie własne]

Na rzutach opisano, dla poszczególnych pomieszczeń, ich powierzchnię, moc znamionową i wartość średniej mocy oświetlenia przypadającej na powierzchnię 1 m<sup>2</sup> oraz oznaczono miejsce zainstalowanych opraw oświetleniowych.

### 5.2.3. Harmonogram pracy w badanym obiekcie

Zgodnie z tezą oraz celem pracy wymagane jest ustalenie ilości energii zużywanej na cele oświetleniowe w ramach badanych pomieszczeń. Zużycie energii jest funkcją zainstalowanej mocy oraz czasu pracy instalacji oświetleniowej. W związku z tym poniżej scharakteryzowano harmonogram pracy szkoły oraz przedstawiono orientacyjne wartości natężenia promieniowania słonecznego w wybranych godzinach i miesiącach. Informacja ta pozwala na poglądowe określenie dostępności światła dziennego, które w zależności od pory roku i godziny, może zostać wykorzystywane do oświetlenia pomieszczeń.

Szczegółowy harmonogram pracy sal lekcyjnych i korytarzy zamieszczono w tabeli 5.1. Dodatkowo w związku z ustalaniem, w dalszych częściach pracy, zużycia energii dla całej szkoły, przyjęto, że sale wykładowe są obciążone wg harmonogramu pracy szkoły od godz. 7:25 do godz. 20:20. W przypadku pomieszczeń administracyjnych, można przyjąć, za pewnymi wyjątkami, że praca odbywa się od godz. 7:00 do godz. 16:00 w zależności od rodzaju i specyfiki pracy użytkownika pomieszczenia. Portiernia pracuje w systemie całodobowym. W tabeli 5.1 zawarto także średnią wartość natężenia oświetlenia, jakie występuje w określonych porach dnia, wyznaczoną dla okresów dwumiesięcznych.

Wartość średnia natężenia oświetlenia została obliczona na podstawie danych z pracy [74], która przedstawia zależności  $E = f(t)$  podane dla czasu środkowoeuropejskiego w wybranych dniach dla bezchmurnego nieba lub z małym zachmurzeniem. Przedstawione uśrednione wartości natężenia promieniowania słonecznego przedstawiono dla zobrazowania dostępności światła dziennego w poszczególnych miesiącach i w godzinach skorelowanych z harmonogramem pracy w szkole. W przypadku korytarzy, które nie mają dostępu do światła dziennego, okres przerw jest ważną informacją przy obliczaniu czasu, w którym oświetlenie będzie działać z pełną mocą oraz kiedy można zaproponować zmniejszenie wartości natężenia oświetlenia sztucznego. Przedstawiony w tabeli 5.1 harmonogram zajęć posłużył do wykonania wieloaspektowych obliczeń zużycia energii elektrycznej w różnych wariantach, z wykorzystaniem danych z tabeli 6.4 przedstawionych w rozdziale 6.5.



Tabela 5.1. Harmonogram zajęć lekcyjnych w szkole oraz wartości natężenia promieniowania słonecznego

Źródło: [opracowanie własne]

L.p.	Przedział czasu	Aktywność	Średnie natężenie promieniowania słonecznego [W/m <sup>2</sup> ]					
			I-II	III-IV	V-VI	VII-VIII	IX-X	XI-XII
-	-	początek dnia szkolnego	0	120	330	420	180	20
1.	7:25 – 8:10	lekcja 0	40	300	530	460	240	40
2.	8:10 – 8:15	<i>przerwa 1</i>	50	330	610	580	320	60
3.	8:15 – 9:00	lekcja 1	150	460	650	630	350	120
4.	9:00 – 9:05	<i>przerwa 2</i>	220	480	700	690	380	130
5.	9:05 – 9:50	lekcja 2	280	580	730	710	480	215
6.	9:50 – 10:00	<i>przerwa 3</i>	300	580	740	750	500	230
7.	10:00 – 10:45	lekcja 3	330	630	750	760	550	335
8.	10:45 – 11:00	<i>przerwa 4</i>	340	640	800	770	570	340
9.	11:00 – 11:45	lekcja 4	380	680	830	785	590	340
10.	11:45 – 11:55	<i>przerwa 5</i>	390	690	810	790	585	330
11.	11:55 – 12:40	lekcja 5	400	690	780	790	580	300
12.	12:40 – 12:45	<i>przerwa 6</i>	390	670	760	770	570	290
13.	12:45 – 13:30	lekcja 6	370	640	750	720	540	240
14.	13:30 – 13:45	<i>przerwa 7</i>	350	560	740	700	510	220
15.	13:45 – 14:30	lekcja 7	300	530	730	690	450	160
16.	14:30 – 14:35	<i>przerwa 8</i>	270	500	680	620	410	150
17.	14:35 – 15:20	lekcja 8	250	480	600	600	370	100
18.	15:20 – 15:25	<i>przerwa 9</i>	150	400	540	510	350	90
19.	15:25 – 16:10	lekcja 9	100	370	520	440	240	60
20.	16:10 – 16:15	<i>przerwa 10</i>	80	200	400	380	220	30
21.	16:15 – 17:00	lekcja 10	70	160	350	370	120	0
22.	17:00 – 17:05	<i>przerwa 11</i>	20	140	320	250	115	0
23.	17:05 – 17:50	lekcja 11	0	130	300	230	90	0
24.	17:50 – 17:55	<i>przerwa 12</i>	0	50	210	210	70	0
25.	17:55 – 18:40	lekcja 12	0	30	140	190	30	0
26.	18:40 – 18:45	<i>przerwa 13</i>	0	0	70	110	15	0
27.	18:45 – 19:30	lekcja 13	0	0	30	80	0	0
28.	19:30 – 19:35	<i>przerwa 14</i>	0	0	30	70	0	0
29.	19:35 – 20:20	lekcja 14	0	0	25	40	0	0
30.	19:30 – 20:30	Sprzątanie, prace techniczne	0	0	20	20	0	0

## 5.3. BEZPRZEWODOWA MATRYCA FOTOMETRYCZNA

### 5.3.1. Budowa i schemat blokowy matrycy pomiarowej

Koncepcja budowy matrycowego urządzenia pomiarowego powstała z konieczności uzyskania wartości natężenia oświetlenia w kilkunastu punktach pomieszczenia jednocześnie oraz wyeliminowania błędów pomiarowych, występujących przy ręcznym pomiarze natężenia oświetlenia z użyciem luksomierza. Badanie ręcznym luksomierzem obarczone było błędami pomiaru, które zostały opisane w rozdziale 5.1 niniejszej rozprawy. Matryca składająca się z 16 głowic pomiarowych i centralnej jednostki wraz z komputerem, który zarządza danymi z punktów pomiarowych umożliwiając ich odczyt, przetwarzanie oraz archiwizację danych. Pierwotnie układ pomiarowy był wyposażony w fotorezystory umieszczone na metalowych stojakach połączonych za pomocą przewodów z jednostką centralną – w tym przypadku Arduino Mega 2560. W mikrokontrolerze odbywał się odczyt wartości analogowych z czujników, ich konwersja do luksów (jednostka natężenia oświetlenia) oraz wysłanie danych poprzez port szeregowy jednostki centralnej. W związku z tym, jedyną możliwością wyświetlenia pomiarów było uruchomienie monitora portu szeregowego na komputerze połączonym z płytką Arduino za pomocą przewodu USB. Schemat działania przewodowej matrycy pomiarowej przedstawiono na rysunku 5.5.



Rys. 5.5. Schemat blokowy układu akwizycji danych z czujników pomiarowych

*Źródło: [opracowanie własne]*

Niedogodności związane z przygotowaniem do pomiarów, długi czas rozmieszczania stojaków pomiarowych, pozostałych elementów matrycy oraz ryzyko poruszenia złączy przewodów podczas pomiarów, a także ograniczone możliwości gromadzenia danych z pomiarów, zdecydowały o opracowaniu rozwiązania bezprzewodowego. Zastosowanie cyfrowych czujników natężenia światła BH1750 znacznie zmniejszyło niepewność pomiarową oraz komfort wykonywania pomiarów. Przy wcześniejszym wykorzystaniu fotorezystorów odczyty posiadały większy margines błędu, a ich wytrzymałość i łatwość montażu odbiegały od obecnie używanych sensorów.

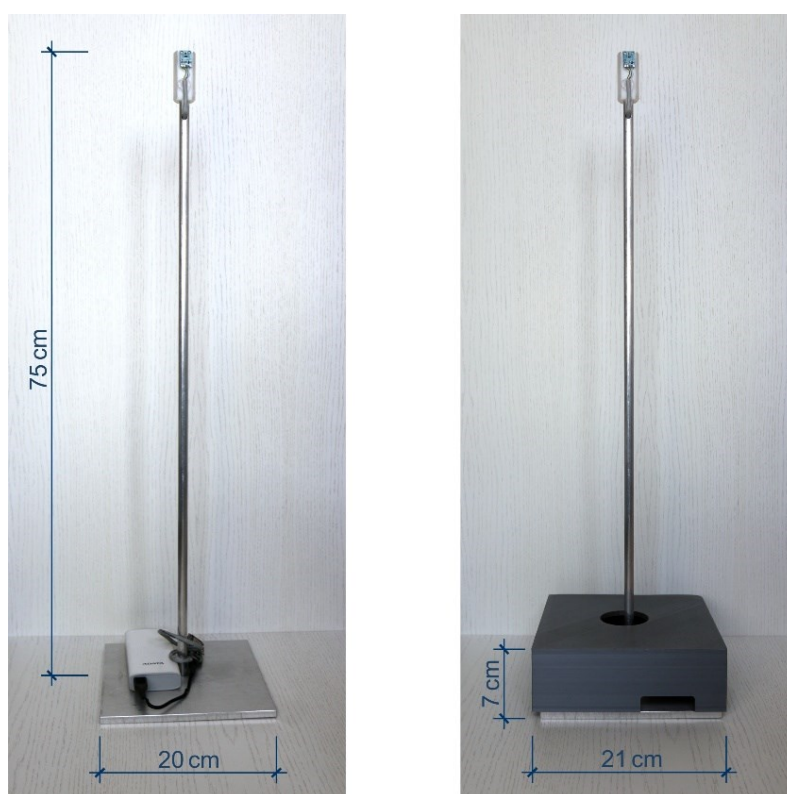
Wykorzystując komunikację poprzez sieć Wi-Fi, zamiast przewodowego połączenia stojaków z jednostką centralną, system jest znacznie łatwiejszy w transporcie, a samo przygotowanie do pomiarów zajmuje mniej czasu. Wybranie minikomputera Raspberry Pi 3B+ – komputera klasy SBC (ang. *Single Board Computer*) jako jednostki centralnej, pozwoliło na stworzenie specjalnego systemu do przetwarzania i archiwizacji danych z pomiarów. Został on zaprojektowany w taki sposób, aby dane z czujników można wyświetlać w czasie rzeczywistym za pomocą przeglądarki internetowej komputera lub telefonu. W przypadku dostępu do sieci Internet można wygenerować arkusz kalkulacyjny zawierający dane z pomiarów, które zostaną przesłane na wskazany adres e-mail. Kolejnym plusem jest zwiększenie stabilności stojaków, wynikające z dodatkowego obciążenia ich podstawy przez baterię akumulatorów. Stojaki pomiarowe wraz z oprzyrządowaniem zostały zaprojektowane i wykonane tak, aby spełniały następujące kryteria:

- mobilność i trwałość;
- bezprzewodowa transmisja danych pomiarowych;
- pomiar ciągły natężenia oświetlenia, przez co najmniej 14 dni.

W celu zapewnienia mobilności i trwałości systemu maszt stojaka został wykonany z cienkiej aluminiowej rurki, za to podstawa stojaka wykonana ze stali zapewnia stabilność konstrukcji podczas pomiaru. Głowica pomiarowa posiada odpowiednio wyfrezowane miejsce na czujnik natężenia oświetlenia wraz z układem scalonym przetwarzającym sygnał. Podstawa stojaka została zaprojektowana w sposób umożliwiający umieszczenie w niej obwodów elektronicznych zapewniających przetwarzanie i transmisję danych oraz akumulatora zasilającego wszystkie obwody stojaka pomiarowego. Całość jest zamknięta, osłonięta lekką obudową z tworzywa, co zabezpiecza elementy i nadaje stojakowi estetyczny wygląd. Na rysunku 5.6 przedstawiono zdjęcie jednego z wykonanych stojaków pomiarowych z naniesionymi parametrami technicznymi.

Każdy stojak, posiada głowicę pomiarową znajdującą się na górze, własną elektronikę do odczytu, przetwarzania i wysyłania danych do serwera oraz akumulator zasilający elementy, które znajdują się w podstawie stojaka (rys. 5.6). Głowica pomiarowa połączona jest z elektroniką przewodem znajdującym się wewnątrz rurki stojaka. Zasilanie akumulatorowe wyklucza problem przewodów połączeniowych pomiędzy stojakiem a jednostką centralną, które powodowały nieład, łatwo się plątały, także wymagały ostrożności przed ich wypięciem lub uszkodzeniem.

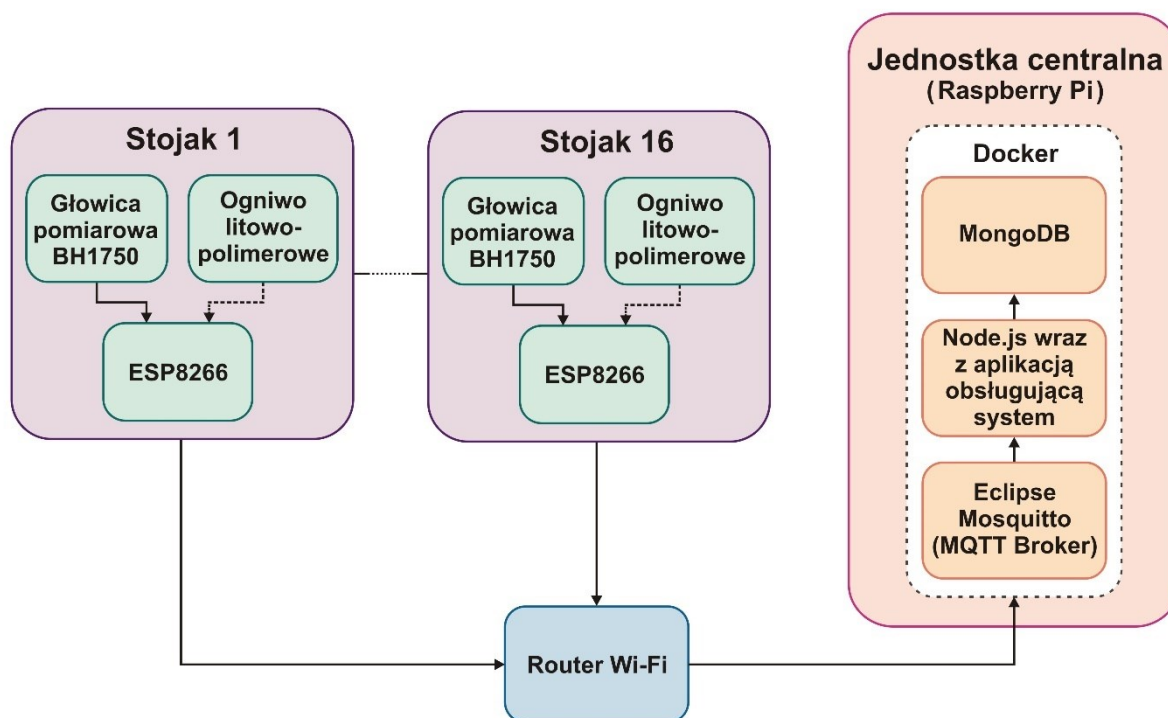
Czas pomiaru natężenia oświetlenia - stojaki z czujnikami natężenia oświetlenia mogą dokonywać pomiarów nieprzerwanie przez około 14 dni. Po tym okresie akumulator musi zostać naładowany. W celu oszczędności energii oraz niepotrzebnego rejestrowania danych, np. w nocy, oprogramowanie stojaka pomiarowego rejestruje natężenie oświetlenia począwszy od wschodu, aż do zachodu Słońca.



Rys. 5.6. Stojak pomiarowy bezprzewodowej matrycy fotometrycznej

*Źródło: [opracowanie własne]*

Matryca pomiarowa natężenia oświetlenia składa się trzech zasadniczych modułów, bloków: układu pomiarowego, routera przekazującego bezprzewodowo dane oraz jednostki odbierającej, przetwarzającej, archiwizującej dane z pomiarów. Schemat blokowy matrycy pomiarowej został przedstawiony na rysunku 5.7. W bloku stojaka pomiarowego oraz w jednostce centralnej oznaczono najważniejsze elementy wchodzące w skład części pomiarowej i jednostki centralnej.

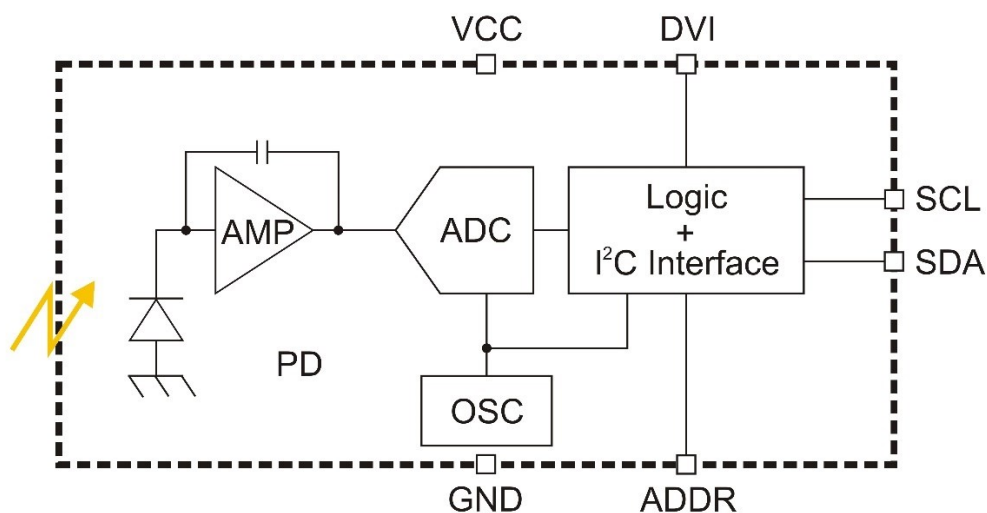


Rys. 5.7. Schemat blokowy działania matrycy pomiarowej natężenia oświetlenia

Źródło: [opracowanie własne]

### 5.3.2. Czujniki pomiarowe i jednostka centralna

Najważniejszym elementem jest głowica pomiarowa umieszczona w części górnej każdego stojaka, na wysokości referencyjnej 75 cm. Czujniki natężenia oświetlenia zostały dobrane w taki sposób, aby ich charakterystyka widmowa była zbliżona do charakterystyki widzenia ludzkiego oka. Schemat blokowy głowicy pomiarowej umieszczonej na stojaku, przedstawiono na rysunku 5.8. Przetwornik optyczny BH1750 umieszczony w głowicy pomiarowej na stojaku posiada zakres pomiarowy od 1 lx do 65 535 lx. Ważną cechą jest niewielka zależność od światła sztucznego (żarowego, fluorescencyjnego i LED). Czujnik nie reaguje także na podczerwień, a jego średni czas pomiaru z rozdzielczością 0,5 lx wynosi 120 ms. Wybór tego elementu, o takich parametrach, pozwala na rozszerzenie możliwości pomiarowych, których można dokonywać w różnych warunkach, mając pewność, że pomiar będzie wolny od zakłóceń i obciążony niewielkimi błędami. Rysunek przedstawiający schemat ideowy głowicy pomiarowej został opracowany na podstawie danych producenta czujnika natężenia oświetlenia. Opisy poszczególnych elementów i ich podstawowe cechy zawarte zostały w legendzie rysunku.



Rys. 5.8. Schemat blokowy głowicy pomiarowej natężenia oświetlenia, gdzie:

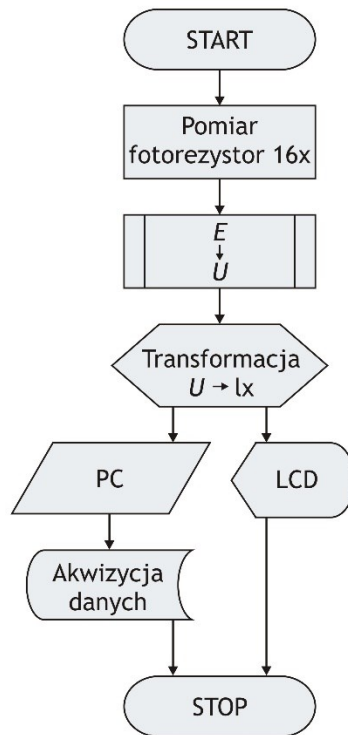
PD – fotodioda z charakterystyką widmową zbliżoną do ludzkiego oka, AMP – wzmacniacz całkujący do konwersji prądu fotodiody na napięcie, ADC – przetwornik analogowo-cyfrowy – do uzyskiwania danych cyfrowych 16-bitowych, Logic+interfejs I<sup>2</sup>C – interfejs magistrali I<sup>2</sup>C z obsługą funkcji logicznych, OSC – oscylator wewnętrzny (320 kHz) służy jako zegar dla logiki wewnętrznej

*Źródło: [opracowanie własne]*

Moduł Logic + interfejs I<sup>2</sup>C służy do przetwarzania wartości pomierzonego oświetlenia otoczenia, ponadto zawiera w sobie interfejs magistrali I<sup>2</sup>C. Zebrane dane na potrzeby transmisji są zapisywane w poniższych rejestrach:

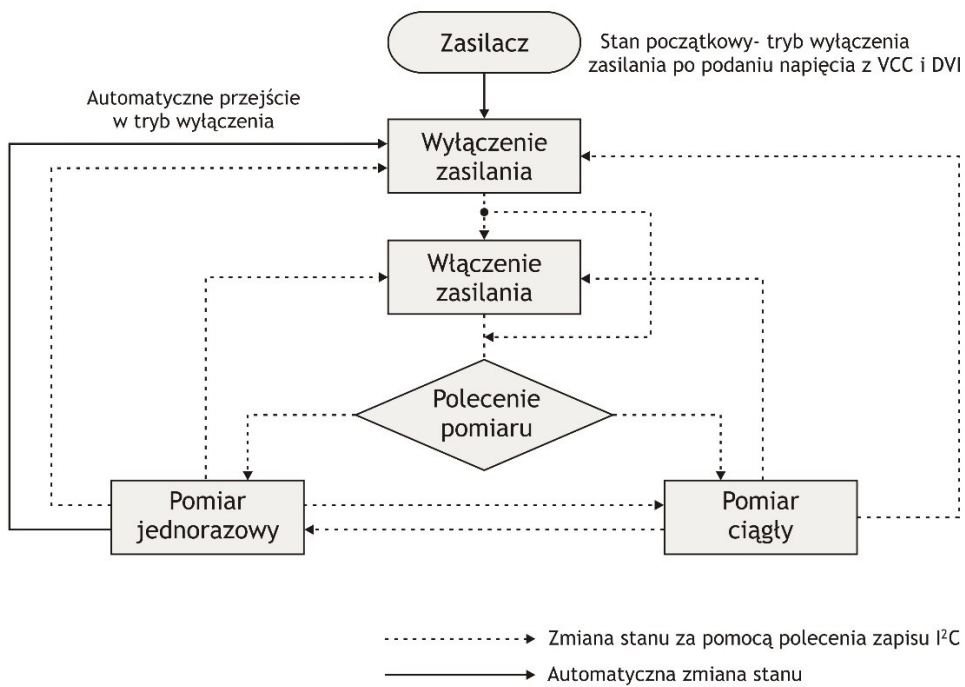
- rejestr danych – służy do rejestracji danych oświetlenia otoczenia, wartość początkowa to "0000\_0000\_0000\_0000";
- rejestr pomiaru czasu – służy do rejestracji czasu pomiaru, wartość początkowa to „0100\_0101”.

Na rysunku 5.9 został przedstawiony diagram algorytmu pomiaru natężenia oświetlenia realizowany za pomocą bezprzewodowej matrycy pomiarowej. Wartość natężenia oświetlenia  $E$  zostaje pomierzona przez 16 niezależnych czujników, które konwertują natężenie oświetlenia na wartość napięcia, które w układzie cyfrowym jest transformowana na wartość wyrażoną w jednostce natężenia oświetlenia luks [lx]. Informacja ta jest przesyłana do wyświetlania oraz do jednostki PC, która zapisuje, archiwizuje otrzymane dane. Kolejny rysunek 5.10 przedstawia ogólną procedurę pomiaru realizowaną przez czujnik natężenia oświetlenia umieszczony w głowicach pomiarowych matrycy, w górnej części stojaka, masztu pomiarowego. Przedstawiona procedura pomiarowa została na podstawie danych producenta czujnika natężenia oświetlenia.



Rys. 5.9. Algorytm pomiaru natężenia oświetlenia z wykorzystaniem głowicy pomiarowej

Źródło: [opracowanie własne]



Rys. 5.10. Procedura pomiaru natężenia oświetlenia pojedynczej głowicy pomiarowej

Źródło: [opracowanie własne]

Jako część hardware'ową jednostki centralnej wybrany został komputer klasy SBC (ang. *Single Board Computer*) Raspberry Pi 3 model B+, który zapewnił realizację zadań związanych z przetwarzaniem danych uzyskanych z szesnastu głowic pomiarowych. Posiadając czterordzeniowy procesor ARM Cortex-A53 działający w architekturze 64-bitowej, taktowany na poziomie 1.4GHz oraz 1 GB pamięci RAM LPDDR2, jest w stanie zapewnić wystarczającą moc obliczeniową do obsługi używanego oprogramowania. Jego niewielkie rozmiary oraz wbudowany moduł Wi-Fi Dual Band 802.11 b/g/n/ac, działający w zakresie 2,4 GHz i 5 GHz, zapewnia wystarczającą, niezawodną, bezprzewodową transmisję danych pomiędzy punktami pomiarowymi a serwerem. Odpowiednie oprogramowanie i konfiguracja, po podłączeniu dedykowanego zasilacza ze złączem microUSB, pozwala na ciągłe wykonywanie pomiarów w różnych pomieszczeniach o przestrzeniach zamkniętych. Niewielkie rozmiary serwera oraz stojaków pomiarowych pozwalają na łatwe przenoszenie matrycy pomiarowej oraz zapewnia wygodę jej użytkowania. Budowa i działanie autorskiej matrycy do pomiaru rozkładu natężenia oświetlenia w pomieszczeniach opisano w publikacji [129].

### 5.3.3. Oprogramowanie matrycy pomiarowej

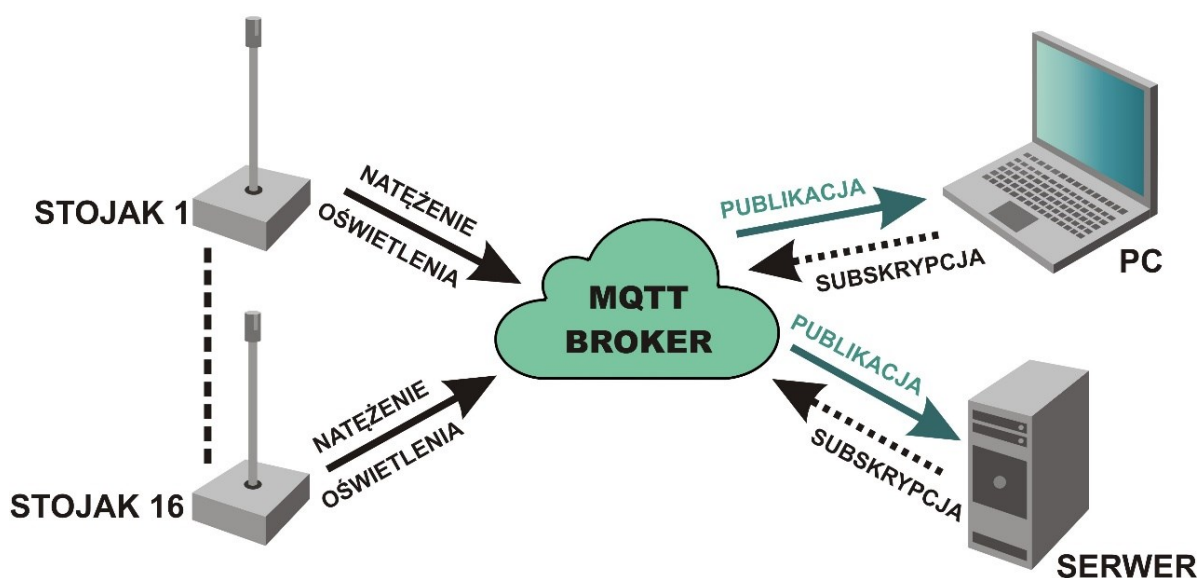
Część programowa matrycy pomiarowej jest zbiorem aplikacji stworzonych do bieżącej rejestracji oraz archiwizacji mierzonych wartości natężenia oświetlenia. Całe oprogramowanie ma budowę modułową i składa się z kilku części. Część software'ową matrycy zbudowano na podstawie dostępnych, nowoczesnych rozwiązań takich jak środowisko uruchomieniowe Node.js, baza danych MongoDB oraz protokół transmisji danych pomiędzy klientem a serwerem MQTT. Zastosowane oprogramowanie cechuje prostota obsługi oraz szerokie możliwości skalowania, w przypadku jego dalszego rozwoju.

**Docker** jest narzędziem realizującym wirtualizację na poziomie systemu operacyjnego. Umożliwia ono uruchamianie oprogramowania zewnętrznego z użyciem kontenerów – małych, uproszczonych systemów operacyjnych zawierających aplikację gotową do działania. Największą zaletą, jak i również głównym powodem wykorzystania tego rozwiązania w projekcie jest możliwość szybkiego rozwijania i wdrażania oprogramowania, bez względu na wykorzystywany system operacyjny. Gotowe, ogólnie dostępne obrazy popularnych rozwiązań informatycznych, które bezpośrednio przekładają się na zawartość i działanie kontenerów, eliminują żmudny proces instalacji, konfiguracji i konieczność dbania o zależności pakietów.



Do przechowywania danych z pomiarów wykorzystywana jest nierelacyjna baza danych **MongoDB** umieszczona w kontenerze Dockera. Oprogramowanie stworzone w C++, zamiast posługiwać się tabelami i rekordami, klasycznymi dla baz SQL, wykorzystuje kolekcje i dokumenty, które zapewniają wysoką elastyczność swojej struktury. Zapytania do bazy wykorzystujące funkcjonalność Aggregation pipelines, wbudowaną w moduł Query API, umożliwiają dowolne filtrowanie, sortowanie, grupowanie oraz przetwarzanie przechowywanych danych z szesnastu czujników pomiarowych.

**Eclipse Mosquitto** uruchomiony w Dockerze jest message brokerem typu open source implementującym protokół MQTT. Jego wysoka wydajność oraz możliwość uruchomienia na różnorodnych urządzeniach, sprawia, że jest popularnym wyborem w systemach wykorzystujących model publish-subscribe, np. Internet of Things. Prosty i niestanowiący obciążenia dla sprzętu protokół MQTT wykorzystuje do swojego działania koncept tematów. Każdy klient podłączony do brokera oraz nasłuchujący danego tematu, otrzyma dane opublikowane pod tym tematem przez innych klientów. W przypadku pomiarów natężenia światła oznacza to, że jednostka centralna uzyskuje wszystkie dane bez konieczności nawiązywania bezpośredniego połączenia z czujnikami, a nawet znajomości adresów IP urządzeń. Rysunek 5.11 przedstawia sposób działania protokołu w bezprzewodowej matrycy fotometrycznej.



Rys. 5.11. Diagram funkcjonowania transmisji danych pomiędzy klientem a serwerem przy użyciu protokołu MQTT w odniesieniu do matrycy fotometrycznej

Źródło: [opracowanie własne]

Środowisko uruchomieniowe **Node.js** wywoływane przez narzędzie Docker, wykonuje kod zawierający całą logikę działania systemu. Oprogramowanie oparte o silnik języka Javascript V8 oraz bibliotekę libUV, wykorzystujące jednowątkowość oraz nieblokującą obsługę wejścia/wyjścia, zapewnia wysoką wydajność niezbędną w projekcie tego typu. Dołączony do bazowej aplikacji manager pakietów NPM, daje dostęp do ogromnej ilości pakietów open source, znacznie przyspieszających wdrażanie kolejnych funkcjonalności systemu.

Aplikacja stworzona do obsługi systemu jako podstawę wykorzystuje prosty i wygodny w użyciu framework aplikacji internetowych **Express**. Pozwala on na szybkie tworzenie rozbudowanych interfejsów API, a także bezproblemową integrację niezależnych paczek, takich jak **Mongoose** – biblioteki umożliwiającej modelowanie i obsługę danych w bazie MongoDB. Paczka Express została skonfigurowana w taki sposób, aby do prezentowania strony internetowej przedstawiającej wyniki pomiarów natężenia oświetlenia w badanym pomieszczeniu wykorzystywała w pełni zintegrowany silnik szablonów **Pug** (wcześniej Jade). Zastosowanie tego rozwiązania pozwala na generowanie odpowiednich widoków, zależnych od logiki wywoływanej przez serwer. Do przesyłania wartości z czujników z jednostki centralnej na strony internetowe uruchomione na komputerach oraz smartfonach służy biblioteka **Socket.IO**. Pozwala ona na dwustronną komunikację w czasie rzeczywistym, podobnie jak protokół MQTT, lecz w warunkach dostosowanych do świata aplikacji webowych. Za generowanie arkuszy kalkulacyjnych z wynikami pomiarów, odpowiada pakiet **ExcelJS**. Dzięki temu oprogramowaniu istnieje możliwość otrzymywania wyników pomiarów wygenerowanych przy pomocy kodu Javascript w formie arkusza kalkulacyjnego Excel przedstawiającego dane w formie liczbowej lub graficznej, za pomocą zdefiniowanego typu wykresu. Po stworzeniu arkusza do jego wysłania na adres e-mail aplikacja wykorzystuje paczkę **Nodemailer**, stosującą do tego działania protokół SMTP. Do przejrzystego prezentowania gromadzonych danych, strona internetowa wykorzystuje bibliotekę **Chart.js**, odpowiadającą za generowanie konfigurowalnych wykresów.

Wymienione programy zostały dobrane w sposób umożliwiający realizację założonych celów związanych z transmisją, wizualizacją, archiwizacją i dostępem przesyłanych danych pomiarowych. Poszczególne moduły oprogramowania zostały testowane niezależnie w różnych warunkach obciążenia danymi oraz dla różnych konfiguracji sprzętowych komputera. Takie działania miały na celu sprawdzenie czy funkcjonowanie części sprzętowej matrycy będzie możliwe z dowolnym komputerem. Dzięki analizom i testom można określić minimalne wymagania sprzętowe komputera zapewniające prawidłowy odczyt, wizualizację

i archiwizację danych. Urządzenie o minimalnych wymaganiach wybrane dla jednostki centralnej, zapewniające optymalną wydajność oraz stabilność to Raspberry Pi 3 model B+.

Akwizycja danych pomiarowych polega na pobraniu z czujnika BH1750 poprzez magistralę I<sup>2</sup>C, a następuje konwersji danych z rejestrów binarnych na dane w wyniku dziesiętnym. Komputer transformuje dane na wartości zmiennoprzecinkowe (float). Po konwersji danych następuje ich przesłanie po sieci Wi-Fi, przy użyciu protokołu MQTT, do stacji bazowej, na której jest umieszczona aplikacja obsługująca system. Po zapisaniu wartości do bazy danych MongoDB, trafia ona na odpowiedni wykres umieszczony na stronie internetowej, za pośrednictwem biblioteki Socket.IO. W przypadku dostępu do sieci Internet istnieje możliwość wygenerowania arkusza kalkulacyjnego zawierającego dane z pomiarów oraz jego przesłanie np. na wskazany adres e-mail.

#### 5.3.4. Metodologia pomiarów

Pomiary natężenia oświetlenia wykonywane są w określonych punktach wnętrza, których liczba jest uzależniona od pola powierzchni danego pomieszczenia. Do ustalenia odpowiedniej ilości punktów pomiarowych w pomieszczeniu stosowany jest wzór:

$$w = \frac{P \cdot Q}{H_m \cdot (P + Q)} \quad (5.1)$$

gdzie:

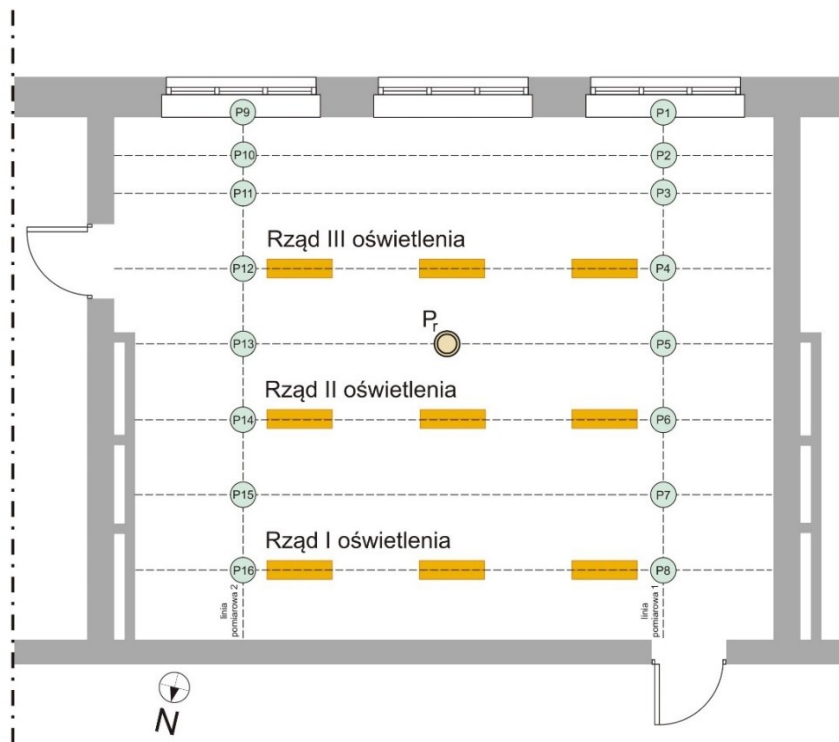
- $w$  – wskaźnik pomieszczenia [-],
- $P$  – długość pomieszczenia [m],
- $Q$  – szerokość pomieszczenia [m],
- $H_m$  – wysokość pomieszczenia [m].

Liczbę punktów pomiarowych ustala się według następujących zależności:

- $w < 1$  liczba punktów pomiarowych wynosi 4
- $1 < w < 2$  liczba punktów pomiarowych wynosi 9
- $2 < w < 3$  liczba punktów pomiarowych wynosi 16
- $w \geq 3$  liczba punktów pomiarowych wynosi 25

W przypadku pomieszczeń, w których wykonywano badania –  $P = 9$  m,  $Q = 7$  m,  $H_m = 3$  m. Zatem współczynnik  $w$  wynosi 1,3, wobec tego minimalna liczba punktów pomiarowych wynosi 9. Dla zwiększenia dokładności pomiarów zdecydowano o budowie matrycy 16-punktowej. Wyznaczono dwa rzędy pomiarowe po 8 punktów w każdym z nich. Pomiary natężenia oświetlenia zostały wykonane na wysokości płaszczyzny zadania 75 cm

(wysokość referencyjna), zgodnie z przyjętą siatką pomiarową. Wyznaczone punkty pomiarowe przedstawiono na rysunku 5.12.

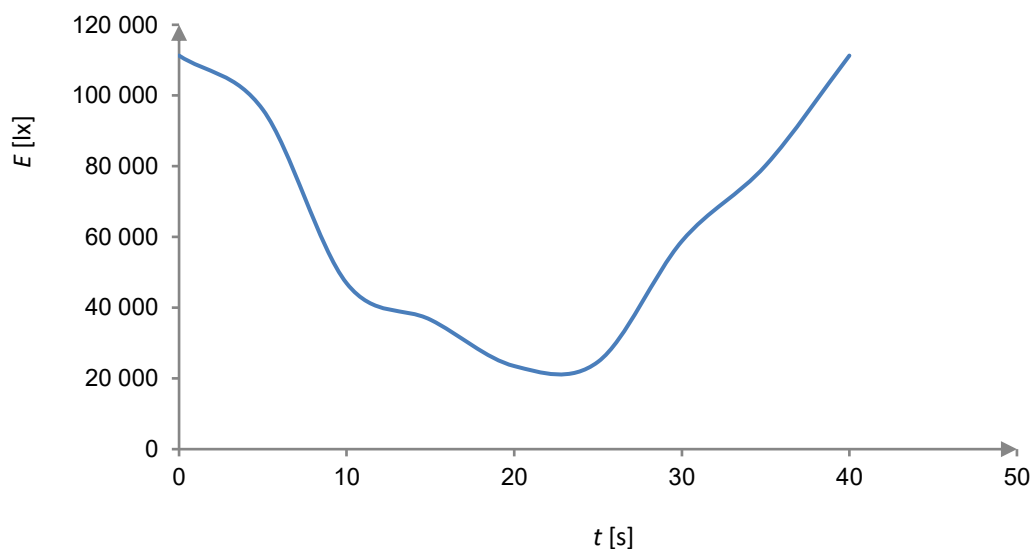


Rys. 5.12. Punkty pomiarowe natężenia oświetlenia w pomieszczeniu od strony S, w którym dokonywano pomiarów

Źródło: [opracowanie własne]

Wyznaczenie rozkładu natężenia oświetlenia w pomieszczeniu wymaga wykonania specyficznych pomiarów polegających na jednoczesnym pomiarze wartości natężenia oświetlenia w kilkunastu punktach, miejscach pomieszczenia. Wykonanie pomiarów w najprostszy, ręczny sposób za pomocą luksomierza jest obarczone dwoma podstawowymi błędami, które wypaczają krzywe rozkładów natężenia oświetlenia w pomieszczeniu. Pierwszym błędem pojawiającym się przy takich pomiarach jest nierównomierność położenia głowicy pomiarowej luksomierza. Trzymanie w ręku odbiornika dokonującego pomiar natężenia światła, jest obarczone błędem pomiarowym wynikającym z nierównomiernego i niestabilnego utrzymania głowicy pomiarowej. Ponadto, dokonując pomiaru ręcznego nie jest możliwe zapewnienie tego samego położenia głowicy pomiarowej we wszystkich miejscach wykonywania pomiaru. Szczególnie widoczne są różnice w mierzonych wartościach przy słonecznym, bezchmurnym niebie. Wówczas promienie padające na głowice mają dużą wartość i minimalne odchylenie ręki, powoduje znaczne zmiany w mierzonych wartościach. Zmiany te mogą wahać się w granicach od kilkudziesięciu, do nawet kilkuset luksów. Drugą wadą pomiaru

ręcznego jest czas jaki upływa od pomiaru w pierwszym miejscu pomieszczenia (P1) a ostatnim punktem pomiarowym (P16). Zakładając nawet sprawne odczytywanie danych, to czas upływający pomiędzy pierwszym i ostatnim pomiarem wynosi co najmniej kilkadziesiąt sekund. Taka rozbieżność czasowa sprawia, że pomiar w pierwszych punktach może być wykonywany w innych warunkach oświetlenia, niż te ostatnie. Wówczas, w szczególności, kiedy występują niewielkie zachmurzenia, to wartości natężenia oświetlenia zmieniają się w ciągu kilku, kilkunastu sekund o nawet kilkadziesiąt tysięcy luksów. Zmienność natężenia promieniowania słonecznego pomierzona w pochmurny dzień w pomieszczeniu od strony południowej, przedstawiono na rysunku 5.13. Natężenie promieniowania słonecznego wynosiło 111 300 luksów, a podczas przysłonięcia chmurą zmalało do wartości 23 500 luksów. Na wykresie widoczne są zróżnicowane wartości natężenia oświetlenia zewnętrznego dla pierwszego punktu pomiarowego znajdującego się bezpośrednio przy oknie. Wykres przedstawia zarejestrowane wartości natężenia promieniowania słonecznego, podczas gdy słońce nie jest przysłonięte chmurą oraz podczas zasłonięcia przez chmurę. Różnica w wartości natężenia promieniowania słonecznego w badanym przypadku wyniosła 87 800 luksów. Pomiaru dokonano w ciągu 40 sekund podczas dnia z dużym zachmurzeniem. Widoczne zróżnicowanie w natężeniu oświetlenia wynika z przesłonięcia słońca przez chmury. Zjawisko to jest istotne w badaniach i pomiarach, ponieważ pozwala na bardziej precyzyjny dobór algorytmów sterowania oświetleniem w pomieszczeniach. Przedstawiony wykres dowodzi także, że różnice natężenia oświetlenia na przestrzeni kilkadziesiątu sekund potrafią być bardzo duże. Uzasadnia to możliwość występowania znacznych różnic przy pomiarze ręcznym pomiędzy pierwszym, a ostatnim punktem pomiarowym. Występowanie tego zjawiska było jedną z głównych przyczyn rozpoczęcia prac nad przygotowaniem innego, efektywnego systemu pomiaru natężenia oświetlenia, które będzie pozbawione tej wady pomiarowej, wprowadzającej duże błędy, a czasami wręcz uniemożliwiającej rzeczywiste pomiary w warunkach niewielkiego zachmurzenia nieba podczas słonecznego dnia.



Rys. 5.13. Zmienność natężenia oświetlenia w punkcie P1 (rys. 5.12) pomieszczenia I (od strony S) w pochmurny dzień 31 maja

*Źródło: [opracowanie własne]*

Zjawisko zmienności natężenia oświetlenia o znacznych amplitudach wymusiło prace nad opracowaniem metody jednoczesnego pomiaru natężenia oświetlenia we wszystkich punktach pomiarowych w pomieszczeniu. Podczas prac zauważono, że dodatkową zaletą wybranej metody pomiarów jest szybkość rejestracji pomiarów, co sprawia, że matryca może zarejestrować nawet kilka pomiarów w ciągu jednej sekundy. Przeprowadzone różne analizy, symulacje i badania innych rozwiązań, dowiodły, że jedynym rozwiązaniem jest wspomniany jednoczesny pomiar wartości natężenia oświetlenia, we wszystkich punktach pomieszczenia. Taką możliwość zapewnia fotometryczna matryca pomiarowa. Niewątpliwą zaletą matrycy pomiarowej jest stabilność położenia czujników natężenia. Największym jednak atutem urządzenia jest możliwość wykonywania precyzyjnych pomiarów we wszystkich kilkunastu punktach jednocześnie. Dodatkowo opracowany software, umożliwia wizualizację natężenia oświetlenia w poszczególnych punktach oraz wyznaczanie w czasie rzeczywistym rozkładów natężenia oświetlenia. Przykładowe zdjęcia rozmieszczenia czujników matrycy w miejscu wykonywania badań przedstawiono na rysunku 5.14.



Rys. 5.14. Bezprzewodowa matryca pomiarowa w miejscu wykonywania badań

*Źródło: [opracowanie własne]*

#### **5.4. ROZKŁAD NATĘŻENIA ŚWIATŁA DZIENNEGO W POMIESZCZENIU**

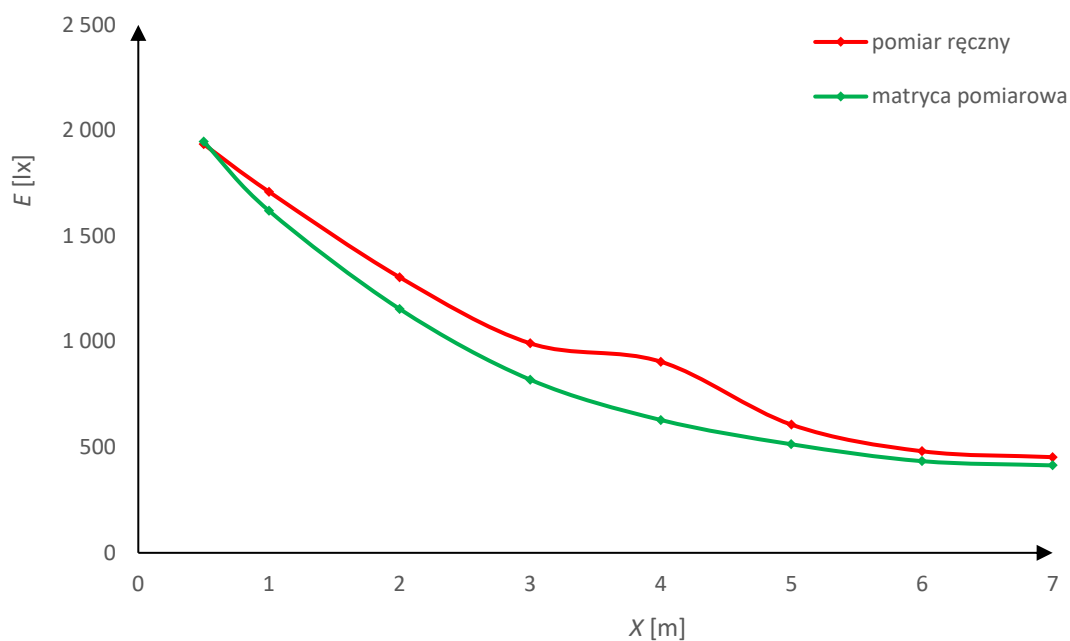
Badania rozkładu natężenia oświetlenia w pomieszczeniach przeprowadzono w okresie od marca 2017 roku do czerwca 2019 roku. W tym okresie pomiary były wykonywane w dwóch pomieszczeniach. Jedno z pomieszczeń usytuowane było w kierunku południowym S (pomieszczenie I), a drugie o takiej samej wielkości, po przeciwległej stronie skrzydła budynku, od strony północnej N (pomieszczenie II).

Przeprowadzone pomiary zostały wykonane w celu uzyskania wyników natężenia oświetlenia pozwalających na wyznaczenie rozkładów natężenia oświetlenia w pomieszczeniu, co pozwala na opracowanie algorytmów sterowania oświetleniem. Oświetlenie sztuczne jest konieczne, gdy w najdalszym punkcie od okna nie ma wystarczającej wartości natężenia oświetlenia. W takich przypadkach w zależności od niedoboru natężenia oświetlenia w pomieszczeniu jest konieczne uruchomienie odpowiednich opraw oświetleniowych. Oczywistym faktem jest, że w przypadku, gdy natężenie oświetlenia w najdalszym punkcie od okna ma wymaganą wartość, to załączenie oświetlenia sztucznego nie jest potrzebne. Zatem pomiary natężenia oświetlenia zostały wykonywane głównie w przypadkach, kiedy natężenie oświetlenia w najdalej położonym od okna miejscu, czyli punkcie pomiarowym P8 lub P16 było

poniżej wymaganej wartości 500 lux. Taką decyzję podjęto ze względu na to, że prace badawcze ukierunkowano na opracowanie systemu sterowania oświetleniem dla wartości granicznej 500 lx. Z założenia system ma wyłączać oświetlenie w chwili przekroczenia wymaganej wartości oświetlenia w danym miejscu pomieszczenia. Zatem jeśli w najdalej odległym od okna miejscu, natężenie oświetlenia będzie większe od 500 luksów, pomiary prowadzące do wyznaczenia rozkładu natężenia oświetlenia w pomieszczeniu, są zbędne pod względem wykorzystania ich w systemie sterowania oświetleniem. Przedstawione w pracy pojedyncze rozkłady natężenia oświetlenia dla pomierzonych wartości powyżej 500 lx w najdalszym punkcie pomiarowym, mają charakter poglądowy i nie zostały użyte do opracowania formuł wykorzystywanych do systemu sterowania oświetleniem.

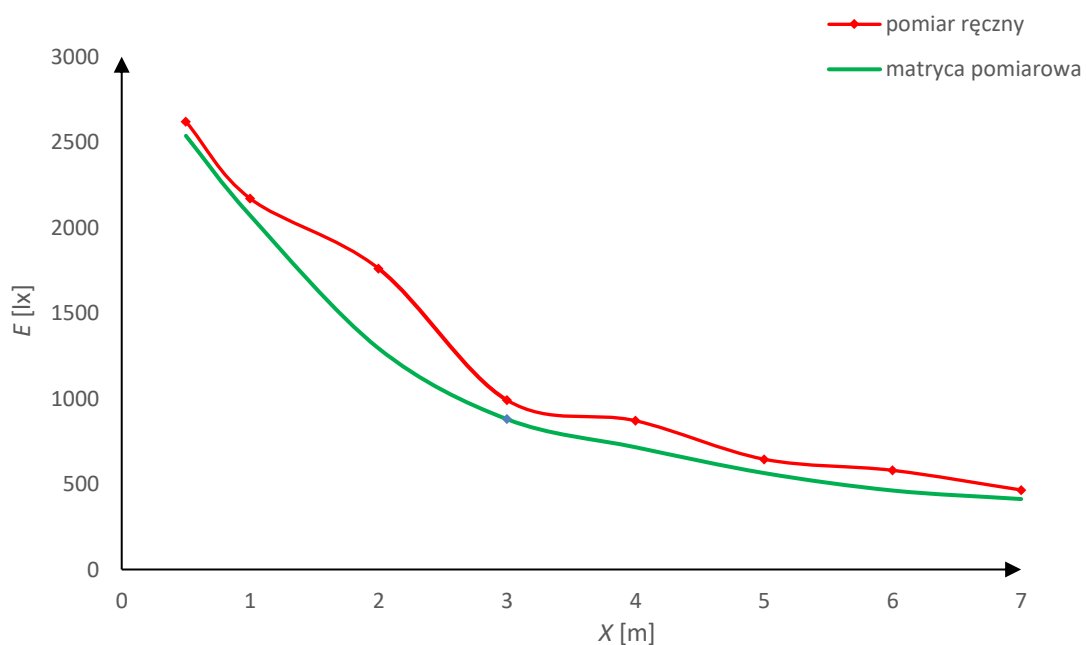
Zasadność wykorzystania bezprzewodowej matrycy fotometrycznej, opisanej w rozdziale 5.3, wykazano dokonując pomiarów natężenia oświetlenia stosując jednocześnie matrycę pomiarową i luksomierz ręczny. Uzyskane wyniki pomiarów natężenia oświetlenia w pomieszczeniu I położonym od strony południowej i w pomieszczeniu II, położonym od strony północnej, przedstawiono odpowiednio na rysunkach 5.14 i 5.15. Na wykresach są widoczne różnice mierzonych wartości natężenia oświetlenia dla pomiarów wykonanych z użyciem matrycy fotometrycznej i luksomierza ręcznego. Otrzymane wyniki pozwoliły potwierdzić fakt, że pomiar ręczny obarczony jest dużymi błędami, które mogą wynikać z niemożności ustawienia przyrządu pomiarowego w takim samym położeniu we wszystkich punktach pomiarowych. Taka niedogodność nie występuje w przypadku wykorzystania matrycy pomiarowej, gdzie wszystkie czujniki są przez cały czas nieruchome, w jednym położeniu. Potwierdzono także kolejną zaletę matrycy bezprzewodowej, polegającą na szybkim, jednoczesnym pomiarze natężenia oświetlenia w szesnastu punktach pomieszczenia. Podczas gdy matryca fotometryczna zarejestrowała w ułamku sekundy wartości natężenia z 16 punktów, to pomiar ręczny od punktu 1 do 16 zajął około 60 sekund. Pomiarów dokonano przy zmieniającym się zachmurzeniu, co pozwoliło na przeprowadzenie analizy, w jaki sposób warunki pogodowe wpływają na rozkład natężenia oświetlenia w pomieszczeniu. Wyniki tego eksperymentu są widoczne również na rysunkach 5.17 i 5.18. Widoczne rozbieżności wynikają ze zmiennych w czasie pomiarów warunków oświetleniowych, które ze względu na bardzo krótki czas potrzebny matrycy na wykonanie 16 pomiarów nie wpływają zasadniczo na kształt rozkładu, który w wypadku pomiaru ręcznego jest odzwierciedleniem zmienności natężenia światła dziennego.





Rys. 5.15. Charakterystyki rozkładu natężenia oświetlenia w pomieszczeniu I w funkcji głębokości  $X$  od strony południowej (S), 21 lipca. Pomiary wykonane ręcznie i za pomocą matrycy

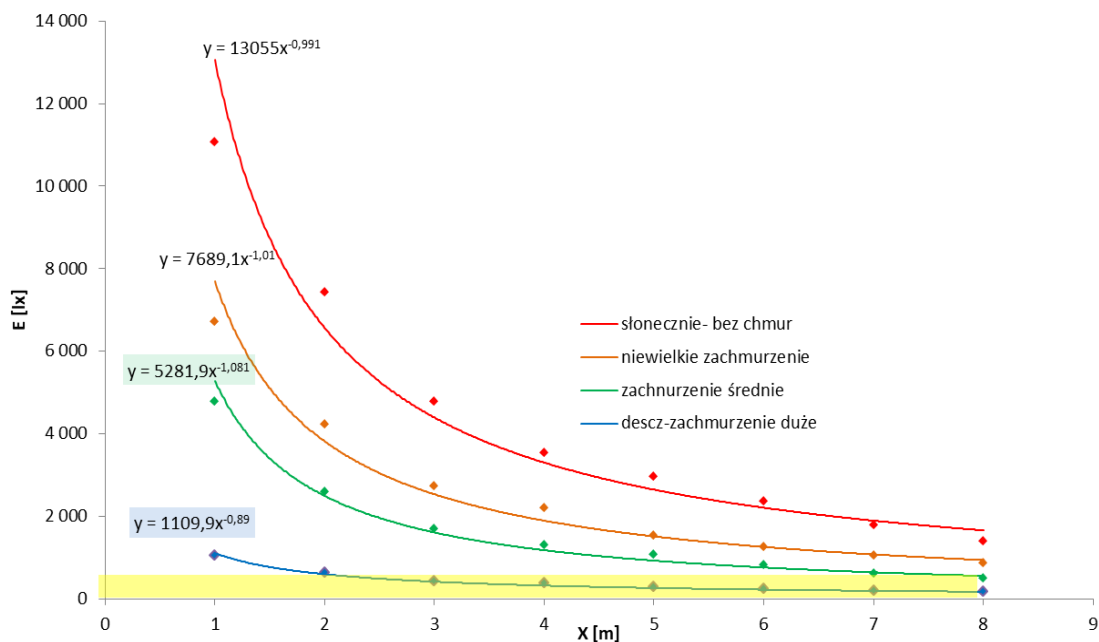
Źródło: [opracowanie własne]



Rys. 5.16. Charakterystyki rozkładu natężenia oświetlenia w pomieszczeniu od strony północnej (N), 21 lipca. Pomiary wykonane ręcznie i za pomocą matrycy

Źródło: [opracowanie własne]

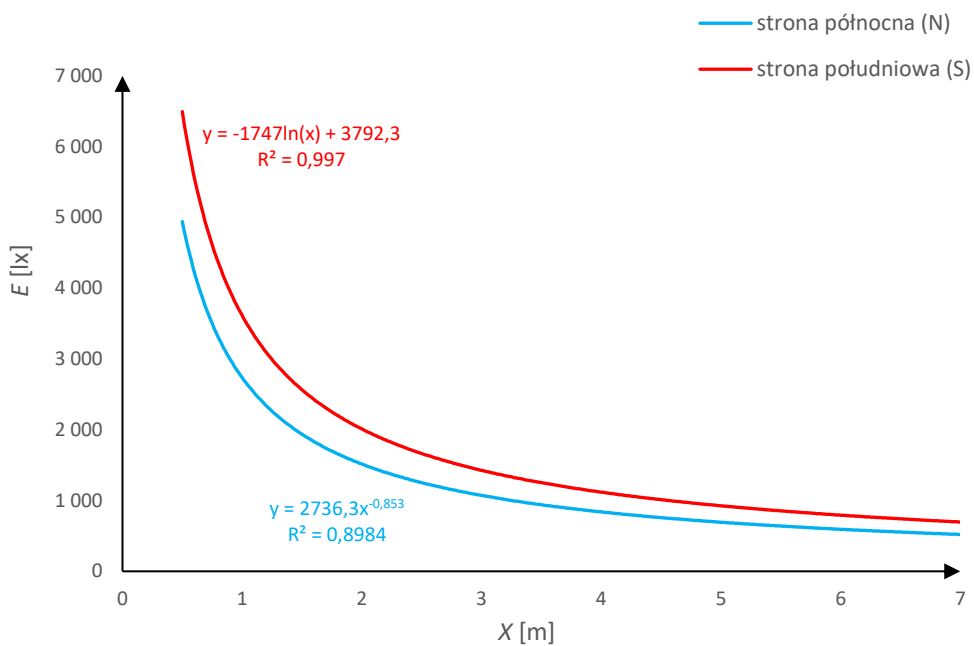
Rysunek 5.17 przedstawia charakterystyki rozkładów natężenia oświetlenia w pomieszczeniu od strony południowej (S), które zostały wyznaczone dla różnych warunków pogodowych. Z wykresów wynika, że podczas dużego zachmurzenia, deszczowego dnia, wymagane natężenie oświetlenia praktycznie nie jest zapewnione na całej głębokości pomieszczenia. W przypadku średniego zachmurzenia jedynie w odległości powyżej 6 m od okien nie ma wystarczającej ilości światła. Natomiast podczas dnia z niewielkim zachmurzeniem i słonecznego, wymagane natężenie oświetlenia występuje na całej powierzchni sali wykładowej. Wymagane natężenie oświetlenia 500 lx, zostało na poniższym wykresie oznaczone kolorem żółtym.



Rys. 5.17. Rozkład natężenia oświetlenia w funkcji głębokości pomieszczenia I (od strony południowej (S) dla różnych warunków atmosferycznych w miesiącu marcu)

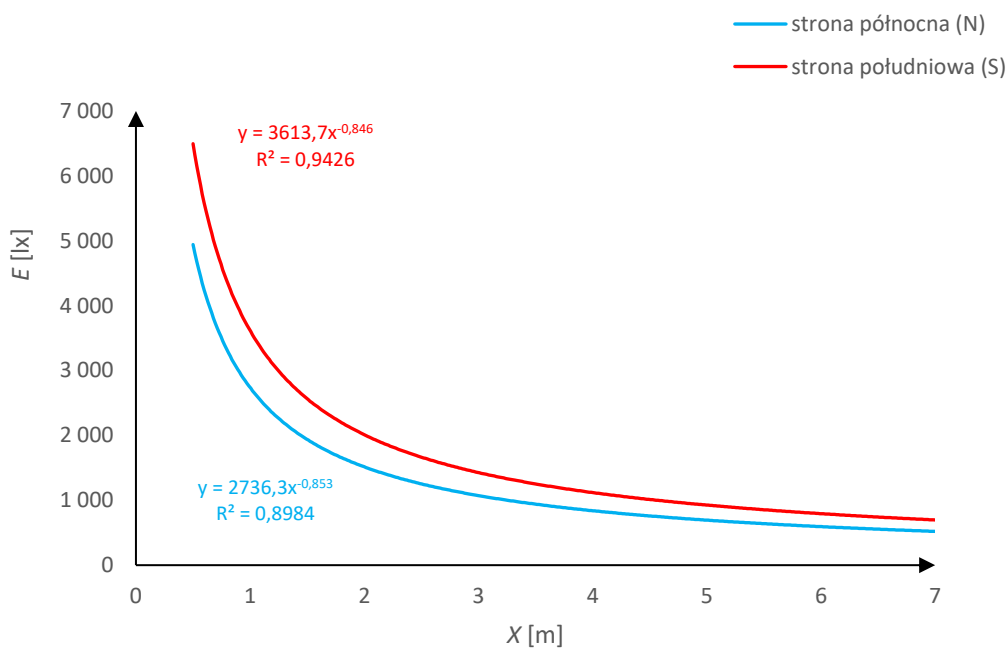
Źródło: [opracowanie własne]

Na rysunkach 5.18, 5.19 i 5.20 przedstawiono rozkłady natężenia oświetlenia w pomieszczeniach od strony południowej (S) oraz północnej (N), wyznaczone na podstawie danych zarejestrowanych w miesiącu marcu dla różnych warunków pogodowych, tj. w dniu bezchmurnym, słonecznym oraz podczas zachmurzenia dużego w deszczowy dzień.



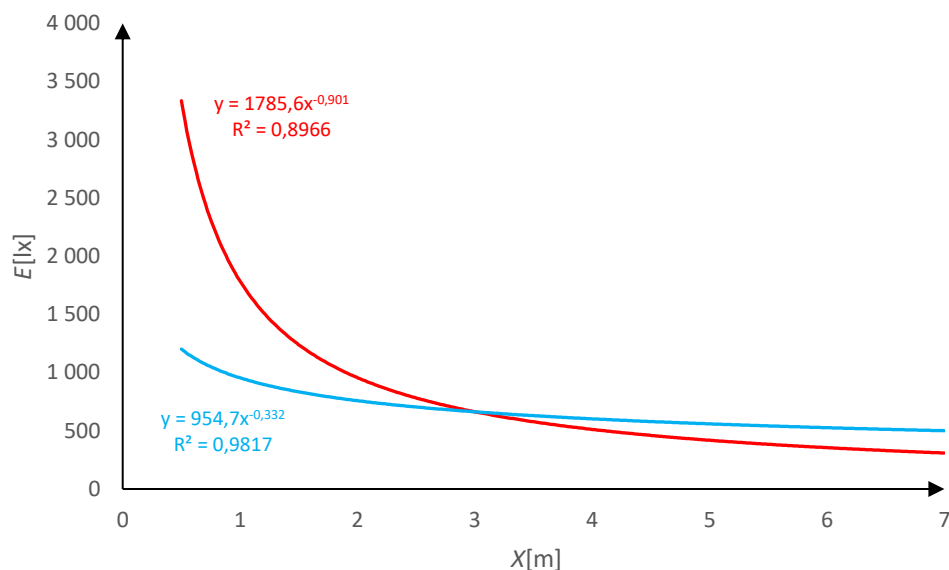
Rys. 5.18. Rozkład natężenia światła w salach od strony S i N w pogodny, bezchmurny dzień, dnia 7 marca

Źródło: [opracowanie własne]



Rys. 5.19. Rozkład natężenia światła w salach od strony N i S w dniu 8 marca z niewielkim zachmurzeniem

Źródło: [opracowanie własne]

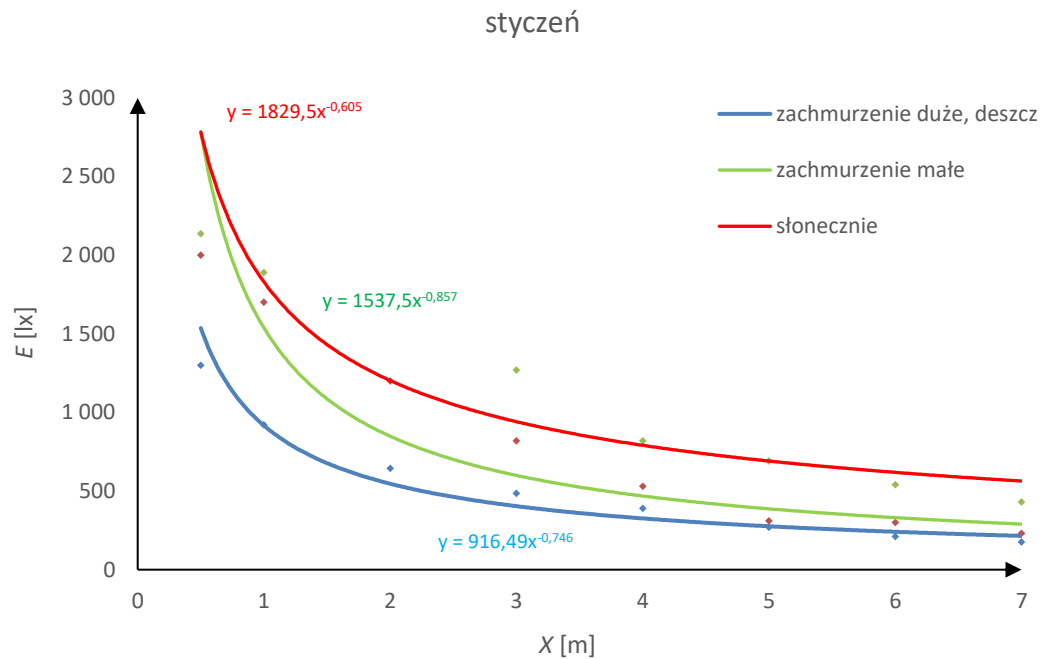


Rys. 5.20. Rozkład natężenia światła w salach od strony S i N w dniu 30 marca z występującymi słabymi opadami deszczu

Źródło: [opracowanie własne]

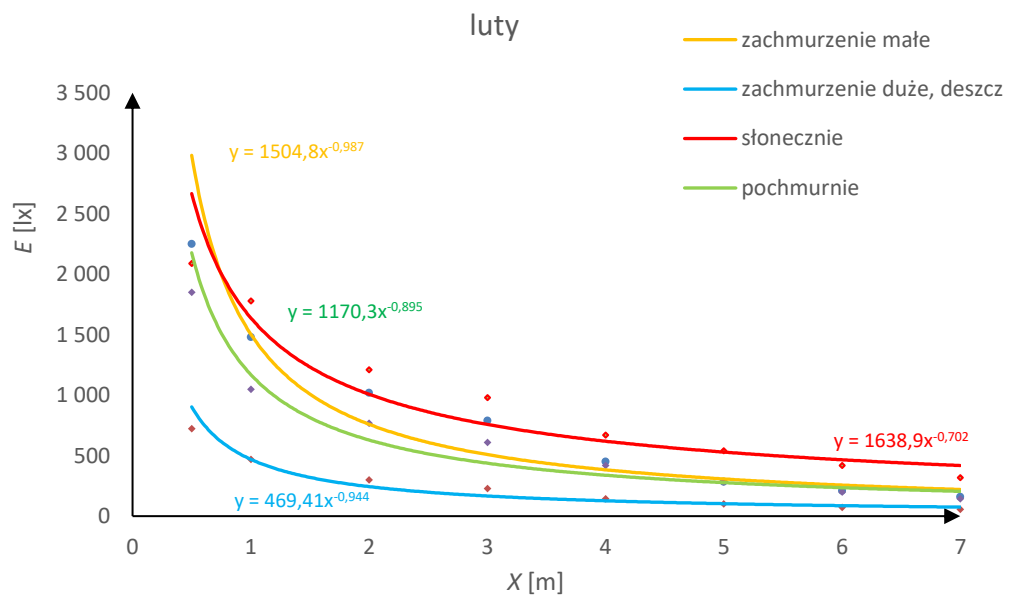
Głównym celem wyznaczania charakterystyk rozkładu natężenia oświetlenia w pomieszczeniach było uzyskanie danych potrzebnych do stworzenia matematycznego opisu rozkładu natężenia oświetlenia. Formuły opisujące rozkłady natężenia oświetlenia posłużyły jako dane wejściowe do układu sterującego oświetleniem sztucznym w pomieszczeniu. Wyznaczone charakterystyki rozkładów natężenia oświetlenia zostały także użyte do określania wartości natężenia oświetlenia w odpowiednich miejscach pomieszczenia, co dostarczyło informacji dotyczących efektywnego sterowania odpowiednimi rzędami opraw oświetleniowych w pomieszczeniu.

Na rysunkach od 5.21 do 5.26 przedstawiono rozkłady natężenia oświetlenia w pomieszczeniu I od strony południowej (S) dla poszczególnych miesięcy w roku. Pomiary wykonano w różnych dniach poszczególnych miesięcy przy zróżnicowanych warunkach pogodowych. Do wykonania analizy wybrano stronę południową, gdyż jak wynika z badań, dynamika zmian wartości natężenia oświetlenia od tej strony jest znacznie większa, a przebiegi rozkładów natężenia oświetlenia w tym samym czasie po stronie północnej (N) są bardzo zbliżone, co w szczególności potwierdzają przebiegi dla różnych warunków atmosferycznych przedstawione na rysunkach 5.18, 5.19 oraz 5.20. Na tym ostatnim widać wyraźnie, że natężenie światła dziennego od strony południowej zmniejsza szybciej swoją wartość do połowy głębokości pomieszczenia, niż analogicznie w pomieszczeniu od strony północnej. Wynika to z wyższych wartości natężenia światła od strony S. Od głębokości około 4 m od okna, zmiany te są zbliżone w pomieszczeniu od strony południowej, jak i od strony północnej.



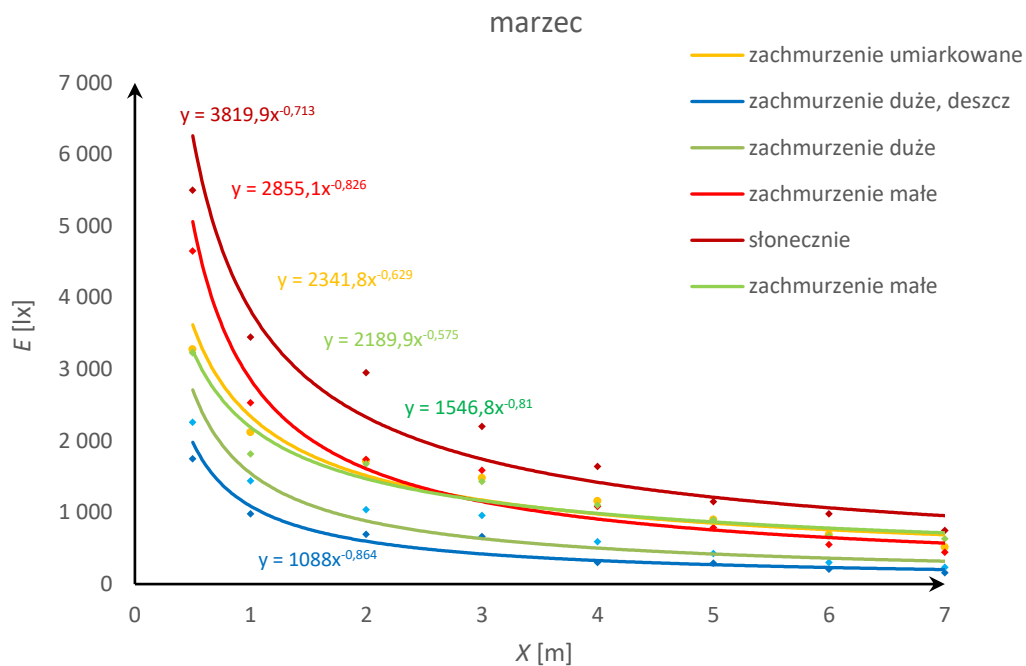
Rys. 5.21. Rozkład natężenia światła w pomieszczeniu od strony S w miesiącu styczniu podczas różnych warunków atmosferycznych

Źródło: [opracowanie własne]



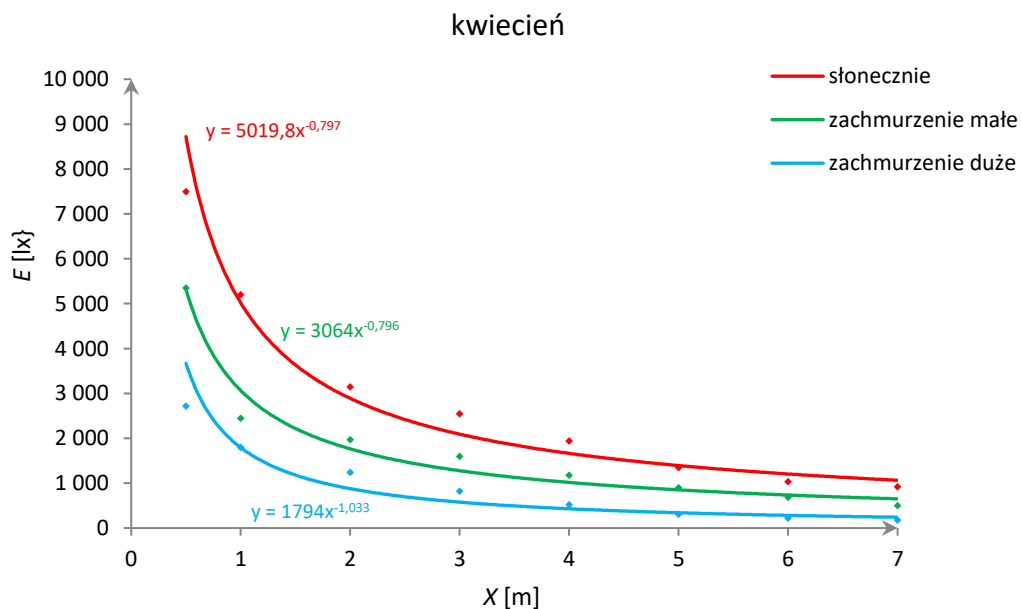
Rys. 5.22. Rozkład natężenia światła w pomieszczeniu od strony S w miesiącu lutym

Źródło: [opracowanie własne]



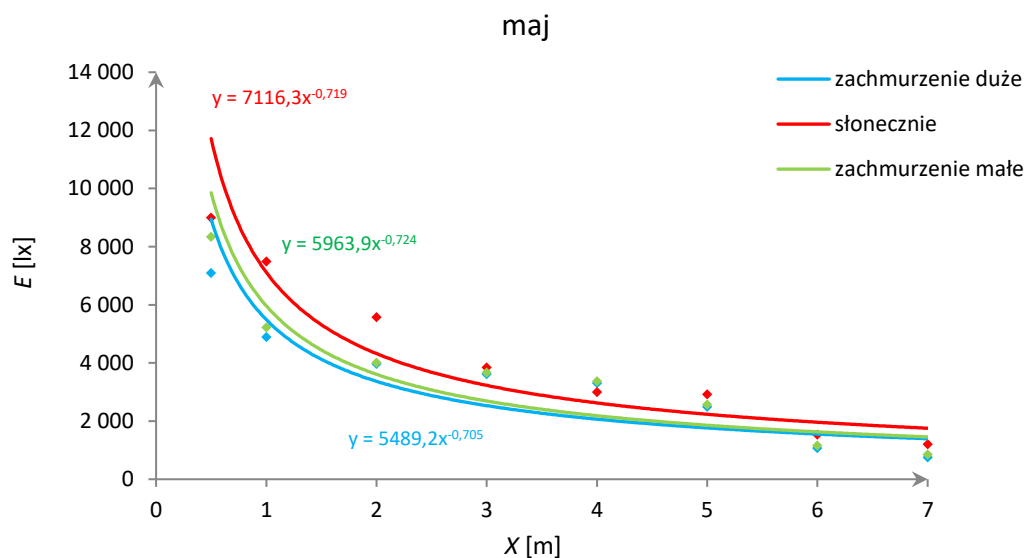
Rys. 5.23. Rozkład natężenia światła w pomieszczeniu od strony S w miesiącu marcu

Źródło: [opracowanie własne]



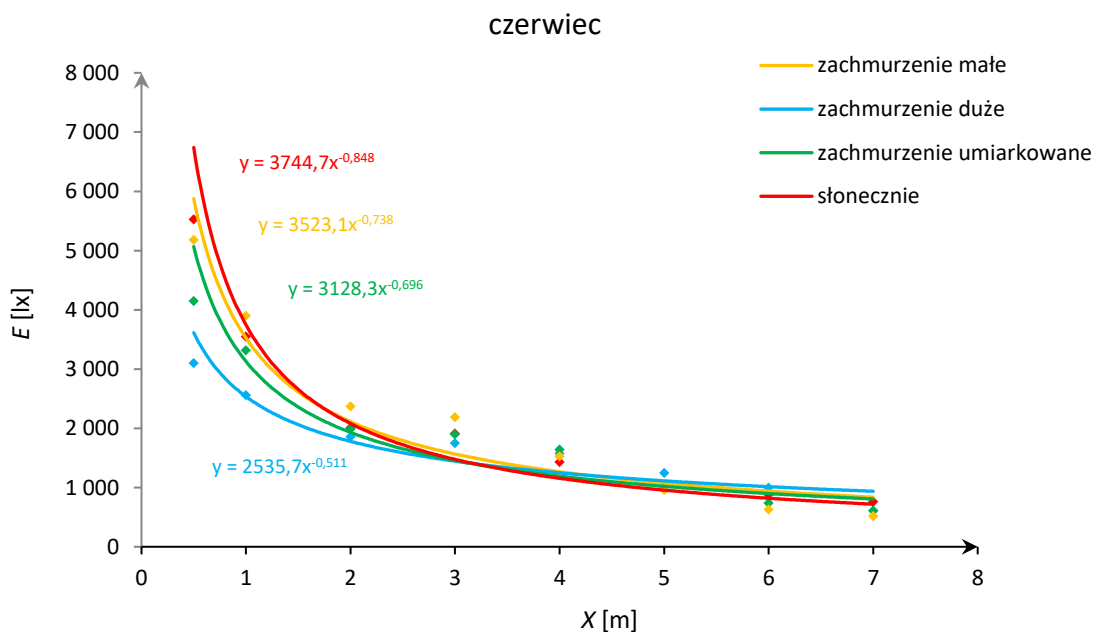
Rys. 5.24. Rozkład natężenia światła w pomieszczeniu od strony S w miesiącu kwietniu

Źródło: [opracowanie własne]



Rys. 5.25. Rozkład natężenia światła w pomieszczeniu od strony S w miesiącu maju

*Źródło: [opracowanie własne]*

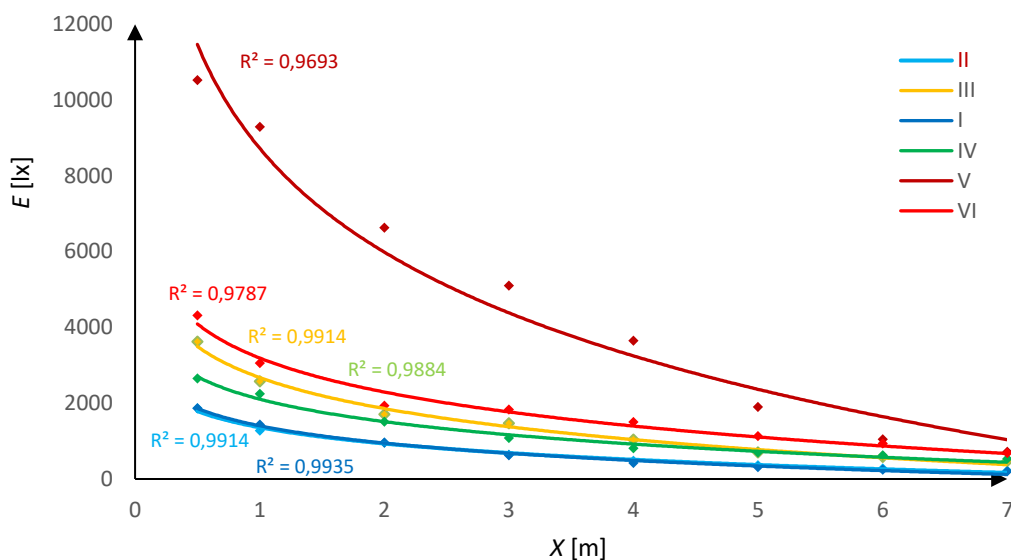


Rys. 5.26. Rozkład natężenia światła w pomieszczeniu od strony S w miesiącu czerwcu

*Źródło: [opracowanie własne]*

Na rysunkach 5.27 oraz 5.28 przedstawiono rozkłady średniego natężenia światła dziennego odpowiednio dla poszczególnych miesięcy w roku. Rysunek 5.27 przedstawia rozkłady natężenia oświetlenia w sali od strony południowej (S) dla wartości średnich

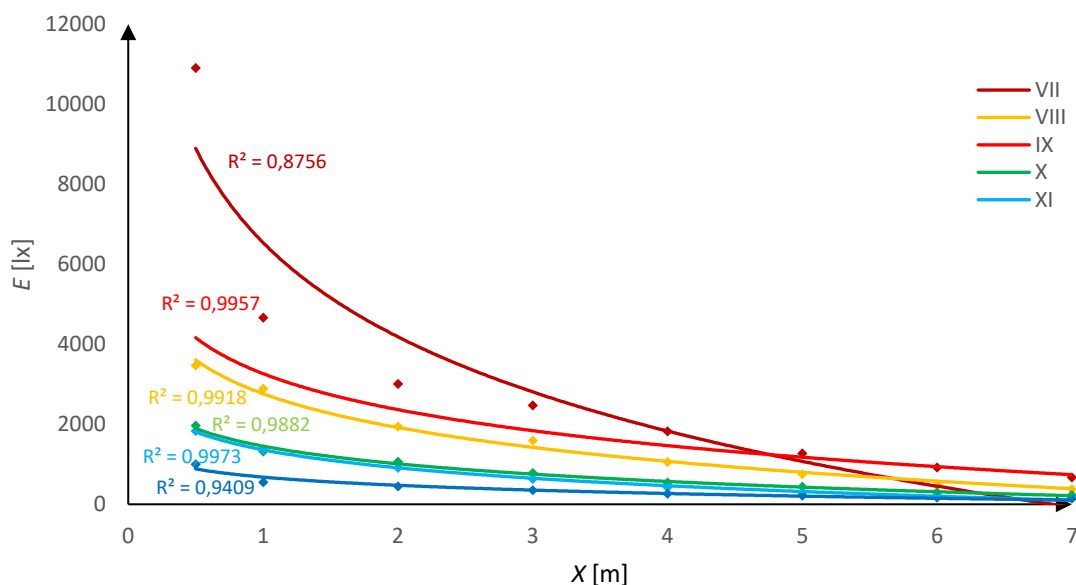
z miesiąca od stycznia (I) do miesiąca czerwca (VI). Średnie wartości natężenia światła naturalnego zostały na wykresach zapproxymowane funkcją logarymiczną.



Rys. 5.27. Średni rozkład natężenia światła dziennego w sali od strony południowej (S) dla poszczególnych miesięcy, od stycznia (I) do czerwca (VI)

Źródło: [opracowanie własne]

Natomiast rysunek 5.28 przedstawia analogiczne rozkłady natężenia światła dziennego dla miesięcy od lipca (VII) do grudnia (XII). Przedstawione na rysunkach 5.27 i 5.28 charakterystyki posłużyły do potwierdzenia prawidłowości zawartych w tabeli 6.1 ustalonych przedziałów dla VI okresów w roku.



Rys. 5.28. Rozkład natężenia światła dziennego w sali od strony południowej (S) dla poszczególnych miesięcy, od lipca (VII) do grudnia (XII)

Źródło: [opracowanie własne]



## 6. IMPLEMENTACJA UKŁADU STEROWANIA OŚWIETLENIEM

### 6.1. ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE

W celu uzyskania oszczędności w zużyciu energii elektrycznej w instalacjach oświetleniowych należy m.in. zastosować odpowiedni układ sterujący oświetleniem. Działanie popularnych układów sterowania odbywa się na podstawie standardowych algorytmów, które nie uwzględniają wszystkich warunków panujących w danym pomieszczeniu. Jedną z najważniejszych informacji, która umożliwiłaby uzyskanie efektywnego sterowania oświetleniem, jest znajomość charakterystyki rozkładu natężenia oświetlenia przy dopływie światła naturalnego. Zastosowanie algorytmu sterowania, które uwzględni wspomnianą charakterystykę rozkładu oświetlenia dla danego pomieszczenia, zapewnia w pełni efektywne sterowanie oświetleniem, przy maksymalnym obniżeniu zużycia energii elektrycznej.

Projektowany w niniejszej pracy system oświetleniowy powinien posiadać następujące cechy:

- spełniać wymagania zawarte w normie oświetleniowej PN - EN 12464-1:2022-01;
- zapewnić jak największą równomierność natężenia oświetlenia na całej powierzchni pomieszczenia;
- wykorzystywać korelacje między czujnikami natężenia oświetlenia zamontowanymi w pomieszczeniu a implementowanym sterowaniem, w oparciu o przeprowadzone w niniejszej rozprawie badania;
- posiadać elementy pomiarowe (czujniki) oraz wykonawcze (aktory), które zapewnią pełną funkcjonalność systemu i umożliwią sterowanie obwodami oświetleniowymi w oparciu o wprowadzone kryteria;
- elementy pomiarowe i wykonawcze, które wchodzi w skład układu są ogólnodostępne i ustandaryzowane zgodnie z normami krajowymi i międzynarodowymi (tabela 2.1).

## 6.2. OPIS UKŁADU STEROWANIA I CHARAKTERYSTYKA URZĄDZEŃ

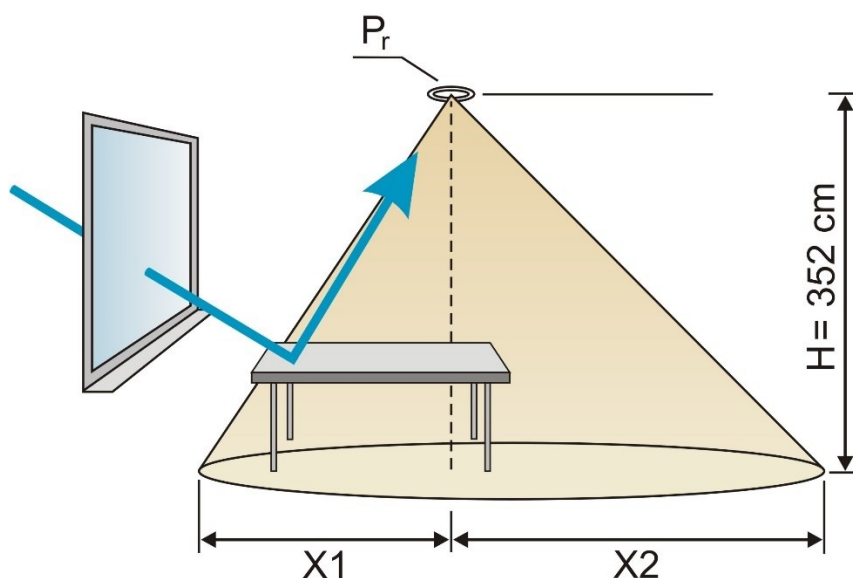
W obecnie wykorzystywanych i rozpowszechnionych systemach sterowania oświetleniem nie osiągamy w pełni efektu równomiernego rozkładu natężenia oświetlenia w pomieszczeniu. Podstawowym problemem uniemożliwiającym precyzyjne sterowanie oprawami oświetleniowymi jest brak informacji dotyczących rzeczywistego rozkładu natężenia oświetlenia w pomieszczeniach. W celu uzyskania informacji o takim rozkładzie natężenia oświetlenia w pomieszczeniu, należało przeprowadzić badania eksperymentalne. Efekty jakie uzyskano można zastosować w układach sterowania oświetleniem, np. z wykorzystaniem systemu, standardu KNX.

Wybór układu sterowania poprzedzała analiza różnych konfiguracji i rozwiązań, które zostały opisane i przedstawione za pomocą schematów ideowych w rozdziale 2.3.2.6 niniejszej rozprawy. Jednym z podstawowych kryteriów wyboru była możliwość zaimplementowania do układu sterowania danych pochodzących z pomiarów natężenia oświetlenia i wyznaczonych na ich podstawie charakterystyk rozkładu natężenia oświetlenia. Zdecydowano się na zastosowanie układu zawierającego wyłącznie urządzenia KNX niezbędne do zrealizowania założonych celów. Opracowany układ sterowania składa się z następujących urządzeń i elementów:

1. Zasilacz systemowy KNX – urządzenie systemowe zasilane napięciem wejściowym  $U = 230 \text{ V}$ , wyposażone w dławik. Napięcie wyjściowe  $U = 29 - 30 \text{ V}$ .
2. Czujnik natężenia oświetlenia + czujnik ruchu  $P_r$  – zintegrowane urządzenie pomiarowo-kontrolne.
3. Wyrobnik (aktor załączający) WR – urządzenie wykonawcze, wielokanałowe sterujące pracą obwodów oświetleniowych, w szczególności wyrobnik po uzyskaniu sygnału „załącz/wyłącz” płynnie zmienia moc źródeł oświetlenia od wartości 0% do 100% i od 100% do 0%, z ustalonym czasem, co zapobiega dyskomfortowi użytkowników, który mógłby mieć miejsce w przypadku sterowania bez wykorzystywania tej funkcjonalności.
4. Moduł arytmetyczno-logiczny L1 (standard KNX, PLC) – urządzenie przetwarzające informacje z czujnika  $P_r$  uwzględniające wprowadzone parametry rozkładów natężenia oświetlenia.

5. Wyłącznik oświetlenia – sensor pozwalający na ręczne sterowanie obwodami oświetleniowymi, niezależnie od działania czujnika  $P_r$  i elementu logiczno-arytmetycznego L1.

Układ jest wyposażony w zasilacz magistralny, który zasila przewód magistralny przesyłający dane pomiędzy wszystkimi połączonymi urządzeniami. Czujnik natężenia oświetlenia i ruchu ( $P_r$ ) posiada parametry dobrane do wielkości pomieszczenia. Zastosowany czujnik został umieszczony w centralnej części sufitu, zgodnie z zaleceniami technicznymi producenta. Parametry położenia i montażu przedstawia rysunek 6.1. Czujnik ten posiada możliwość niezależnego pomiaru natężenia światła sztucznego oraz światła naturalnego, tzw. „światła tła”. Dzięki tej właściwości załączenie oświetlenia sztucznego nie wpłynie na pomiar wykonywany przez czujnik  $P_r$ . Zastosowanie jednego elementu pomiarowego w postaci czujnika ruchu i jasności wpływa na uproszczenie wykonania instalacji. Ma to duże znaczenie w przypadku implementacji takiego systemu sterowania oświetleniem w istniejących obiektach, w których planuje się wykonanie modernizacji i instalację proponowanego systemu. Dodatkowo zastosowano także wyłącznik/sensor, który pozwala w trybie nadrzędnym na ręczne załączenie i wyłączenie oświetlenia przez użytkownika. Cały układ działa w pierwotnie wybranym standardzie KNX. Poglądowy schemat ideowy zastosowanego systemu sterowania został przedstawiony na rysunku 6.2.

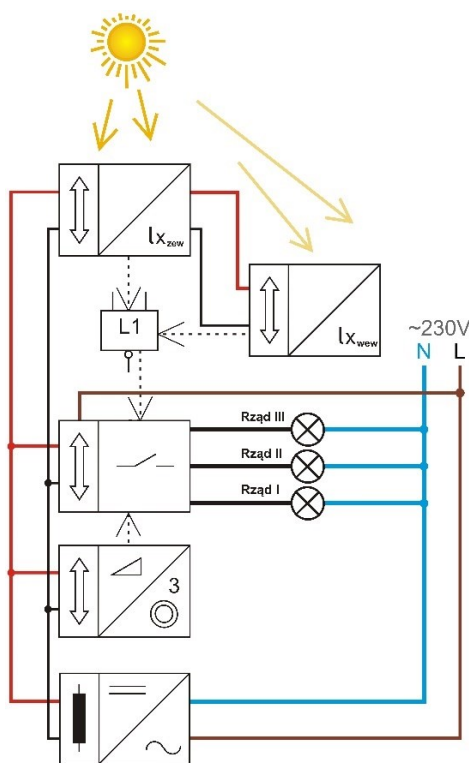


Rys. 6.1. Charakterystyczne parametry umiejscowienia regulatora natężenia w badanym pomieszczeniu

Źródło: [opracowanie własne]

Zdecydowano się na wybór urządzeń sterujących oświetleniem w systemie KNX, m.in. ze względu na:

- powszechność tego standardu na całym świecie;
- łatwą integrację z dowolnymi oprawami oświetleniowymi;
- wysoką niezawodność systemu;
- szeroką gamę urządzeń systemowych, magistralnych, wykonawczych i sterujących.



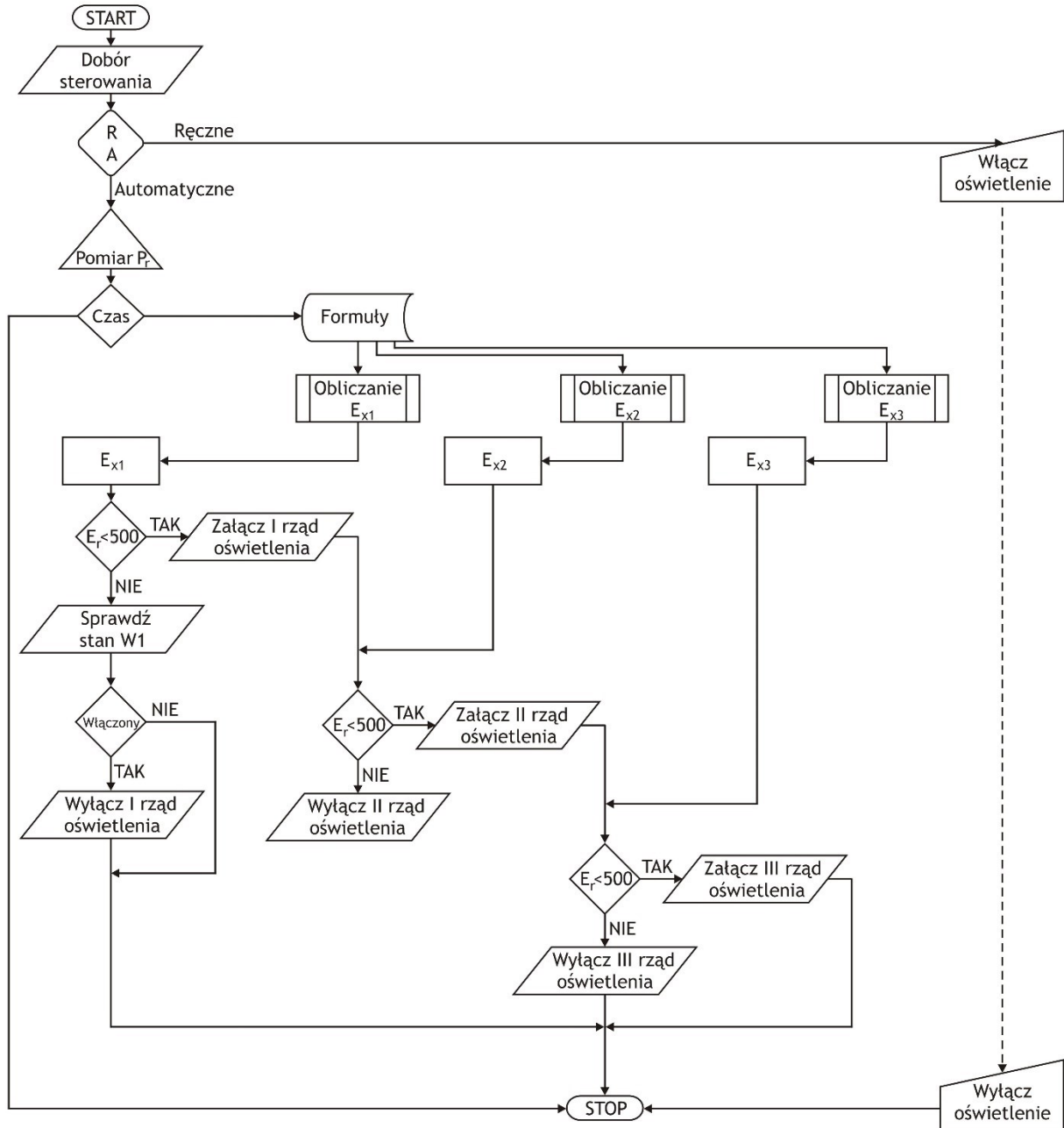
Rys. 6.2. Poglądowy schemat systemu sterowania oświetleniem w standardzie KNX

Źródło: [opracowanie własne]

Dla zapewnienia kompatybilności i zwiększenia niezawodności oraz ułatwienia programowania, użyto urządzeń tego samego producenta. Dane dotyczące wyznaczonych rozkładów natężenia oświetlenia, wprowadzone do wspomnianego modułu arytmetyczno-logicznego, pozwoliły na uzyskanie możliwości regulacji natężenia oświetlenia w poszczególnych rzędach opraw oświetleniowych.

Algorytm działania opracowanego układu sterowania oświetleniem sztucznym w pomieszczeniu, z wykorzystaniem formuł opisujących rozkłady natężenia w pomieszczeniu, został przedstawiony na rysunku 6.3. W opracowanym systemie sterowania założono możliwość niezależnego, ręcznego sterowania oświetleniem. Rozwiązanie takie zostało

przyjęte jako nadrzędne, aby użytkownik w dowolnym momencie mógł decydować o załączeniu i wyłączeniu oświetlenia w pomieszczeniu.



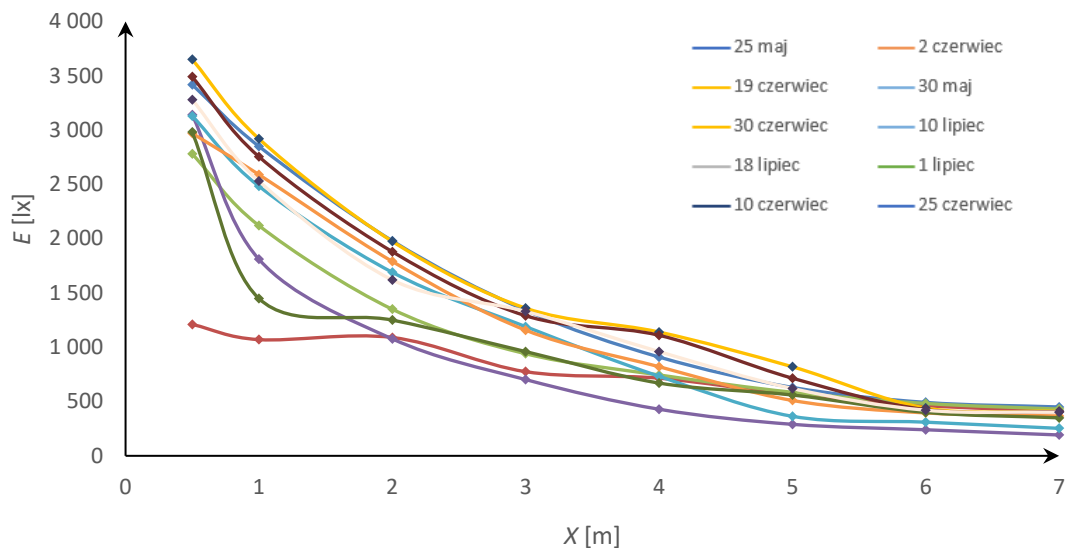
Rys. 6.3. Algorytm opracowanego systemu sterowania oświetleniem w pomieszczeniu

Źródło: [opracowanie własne]

### 6.3. IMPLEMENTACJA ROZKŁADÓW NATEŻENIA OŚWIETLENIA W SYSTEMIE KNX

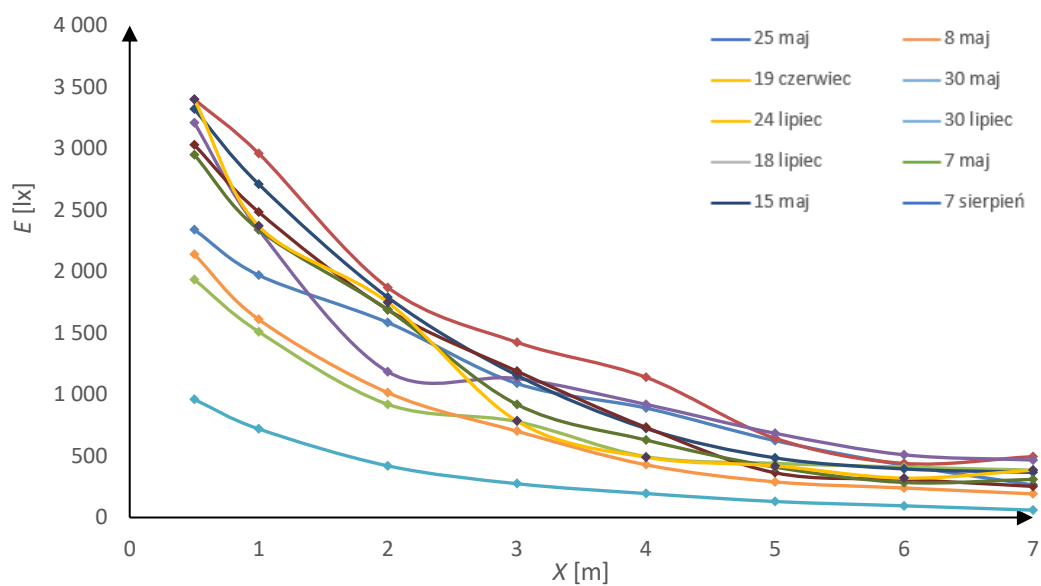
W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki pomiarów natężenia oświetlenia, na podstawie których wyznaczono jego rozkłady, które z kolei zaimplementowane są w elementach sterujących oświetleniem sztucznym w pomieszczeniu. Na podstawie pomiarów stwierdzono, że wartość  $E_r$  mierzona przez czujnik sterujący  $P_r$  (rysunek 6.1) oraz wartości pomierzone przez matrycę fotometryczną w punktach P5 oraz P13 (rysunek 5.12) są ze sobą zbliżone. Zdecydowano zatem, że punktem odniesienia dla obliczeń będzie wartość natężenia z czujnika P5 matrycy pomiarowej. Ten punkt pomiarowy jest położony w takiej samej odległości od okna, jak czujnik natężenia oświetlenia sterujący systemem oświetlenia. Przeprowadzone pomiary z użyciem matrycy fotometrycznej pozwoliły na zgromadzenie wartości natężenia oświetlenia w pomieszczeniach na przestrzeni wszystkich miesięcy w roku i dla różnych warunków atmosferycznych. W rozdziale 5.4 opisano szczegółowo rozkłady natężenia oświetlenia w badanych pomieszczeniach.

Zapewnienie efektywnego sterowania oświetleniem, które wykorzystuje wyznaczone rozkłady natężenia oświetlenia wymagało opisanie tych rozkładów formułami matematycznymi, które zostają wprowadzone do elementu arytmetyczno-logicznego użytego w układzie sterowania oświetleniem. Natężenie promieniowania naturalnego zależy od wysokości Słońca nad horyzontem oraz warunków pogodowych panujących w danej chwili. Warto jednak zauważyć, że w biegu rocznym, pozorny ruch Słońca na niebie w okresie zimowo-wiosennym jest symetryczny do ruchu w okresie letnio-jesiennym. Dla przykładu, 21 marca i 23 września pozorna droga Słońca na horyzontem jest praktycznie taka sama. Ponieważ u podstaw określania wartości natężenia oświetlenia naturalnego jest położenie Słońca nad horyzontem, to zdecydowano o podziale całego roku na sześć przedziałów czasowych o zbliżonym dobowym ruchu Słońca po niebie (tabela 6.1). Przebiegi rozkładów natężenia oświetlenia naturalnego w pomieszczeniu od strony południowej (S) przedstawiono dla wyznaczonych okresów na rysunkach od 6.4 do 6.9. Na podstawie danych zostały opracowane formuły matematyczne opisujące rozkłady natężenia oświetlenia dla odpowiednich okresów. Poprawność ustalenia sześciu okresów zawartych w tabeli 6.1 potwierdzają uśrednione rozkłady natężenia światła dziennego wykonane dla poszczególnych miesięcy i przedstawione na rysunkach 5.27 oraz 5.28.



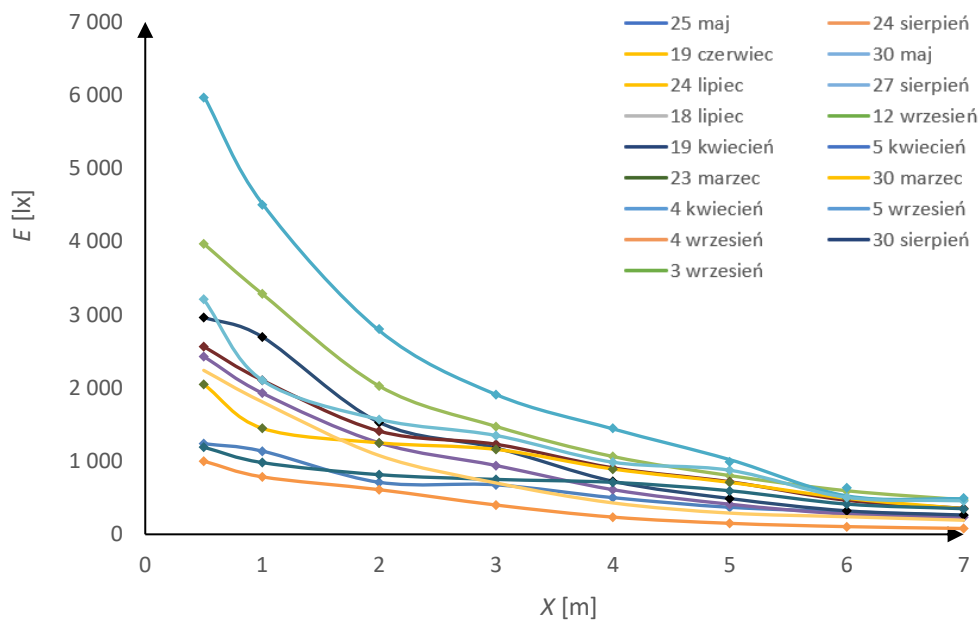
Rys. 6.4. Charakterystyki rozkładów natężenia oświetlenia w pomieszczeniu od strony południowej (S) w I okresie

Źródło: [opracowanie własne]



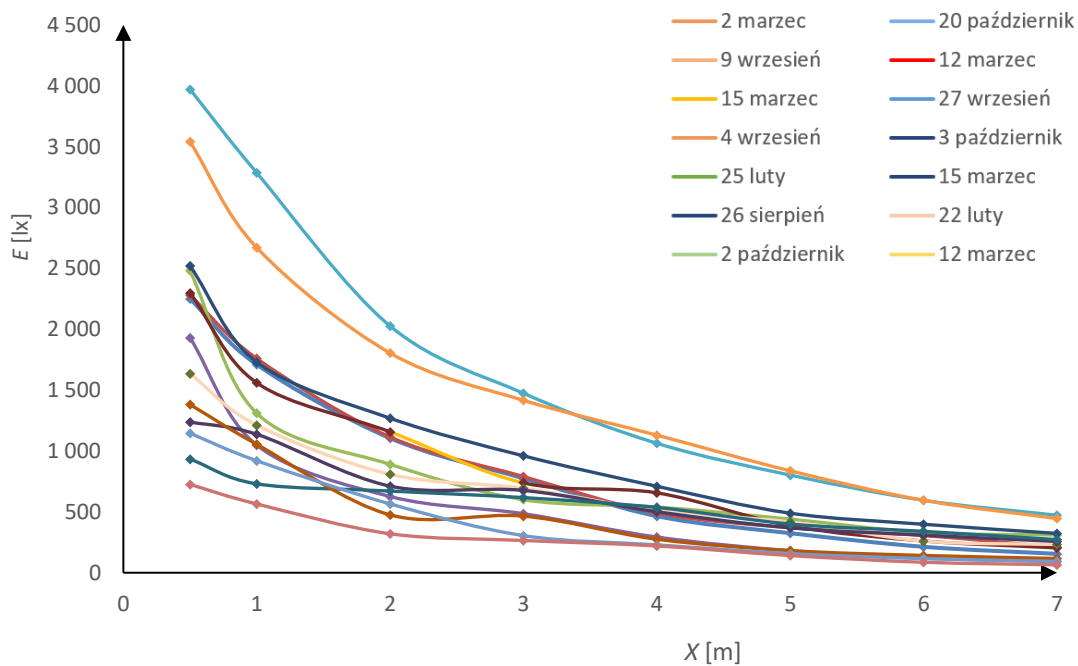
Rys. 6.5. Charakterystyki rozkładów natężenia oświetlenia w pomieszczeniu od strony południowej (S) w II okresie

Źródło: [opracowanie własne]



Rys. 6.6. Charakterystyki rozkładów natężenia oświetlenia w pomieszczeniu od strony południowej (S) w III okresie

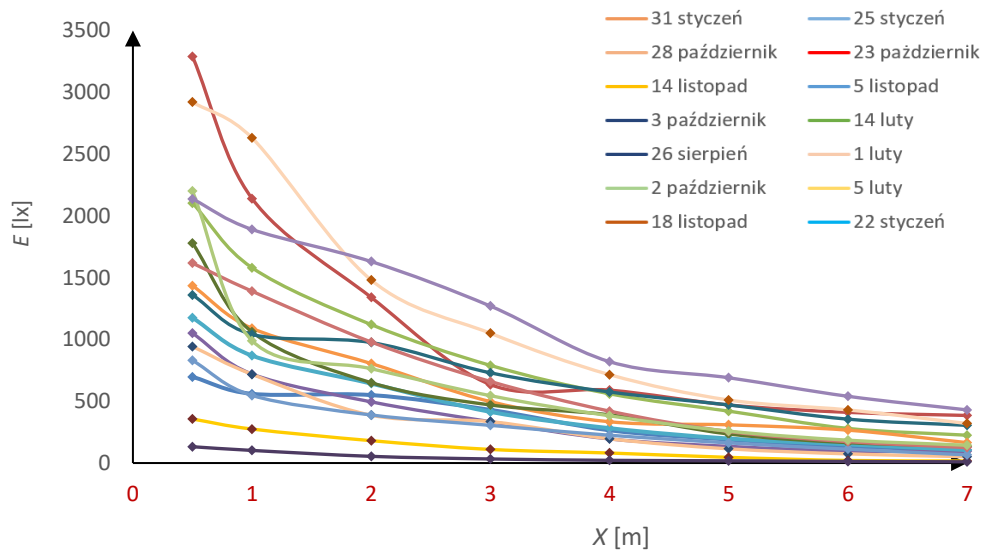
Źródło: [opracowanie własne]



Rys. 6.7. Charakterystyki rozkładów natężenia oświetlenia w pomieszczeniu od strony południowej (S) w IV okresie

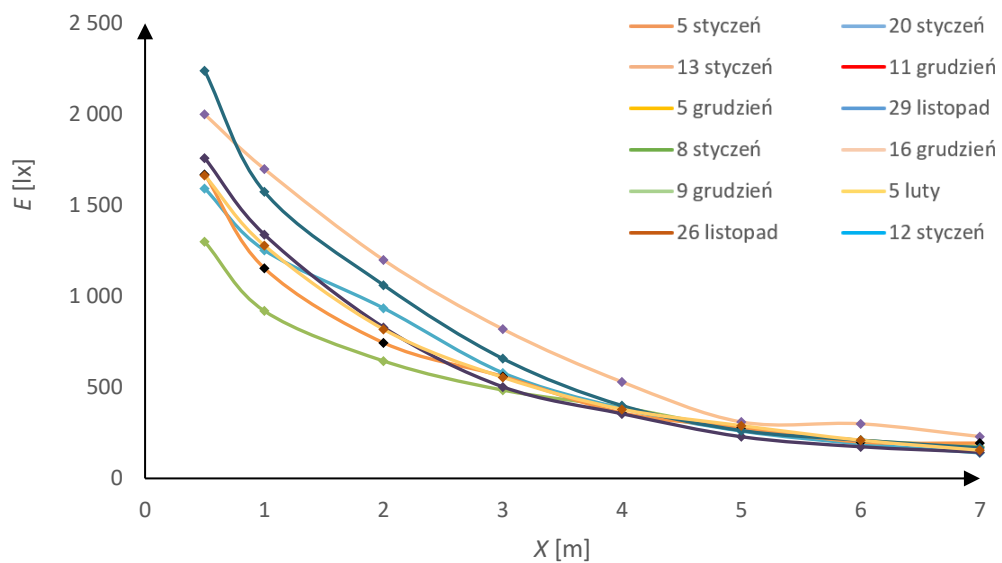
Źródło: [opracowanie własne]





Rys. 6.8. Charakterystyki rozkładów natężenia oświetlenia w pomieszczeniu od strony południowej (S) w V okresie

Źródło: [opracowanie własne]



Rys. 6.9. Charakterystyki rozkładów natężenia oświetlenia w pomieszczeniu od strony południowej (S) w VI okresie

Źródło: [opracowanie własne]

Próby parametryzacji rozkładów natężenia oświetlenia, na podstawie pomiarów P1-P8 w pierwszym rzędzie oraz analogicznie pomiędzy P9 a P16 w drugim rzędzie pomiarowym, pokazały, że najlepiej nadaje się do tego funkcja potęgowa postaci:

$$y=d \cdot x^c \quad (6.1)$$

Na rysunku 6.11 pokazano jeden z przykładów. W trakcie poszukiwań najlepiej dopasowanej funkcji do opisanego rozkładu natężenia oświetlenia posłużono się wbudowaną w arkusz kalkulacyjny procedurą dodawania linii trendu do stworzonego wykresu. Procedura ta wykorzystuje metodę najmniejszych kwadratów i jest przydatna na etapie poszukiwań, natomiast z uwagi na czasochłonność nie nadaje się do analizy dużych zbiorów danych.

W celu wyznaczenia parametrów funkcji (6.1) posłużono się wbudowaną bezpośrednio w arkusz kalkulacyjny procedurą wyznaczania regresji liniowej. Należy tu zaznaczyć, że w obu przypadkach jest to metoda najmniejszych kwadratów, jednak ta druga procedura pozwala na uzyskanie parametrów  $d$  i  $c$  funkcji (6.1) wraz z parametrami statystycznymi bezpośrednio w komórkach arkusza oraz automatyzację tej czynności. Aby można zastosować tę procedurę należy zlogarytmować i przekształcić obustronnie funkcję (6.1):

$$\ln(y) = \ln(d \cdot x^c)$$

$$\ln(y) = \ln(d) + \ln(x^c)$$

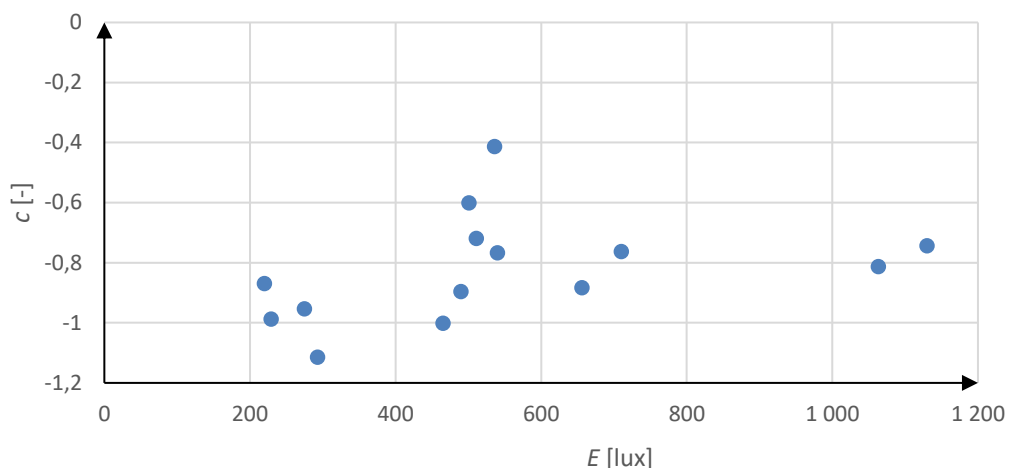
$$\ln(y) = \ln(d) + c \cdot \ln(x)$$

$$\ln(y) = c \cdot \ln(x) + \ln(d)$$

Wówczas, aby znaleźć  $c$  i  $\ln(d)$  stosujemy procedurę wyznaczania regresji liniowej, gdzie  $\ln(y)$  i  $\ln(x)$  to odpowiednio logarytm natężenia światła w punktach pomiarowych, a  $\ln(x)$  logarytm odległości od okna. Parametr  $d$  uzyskujemy odwracając  $\ln(d)$ .

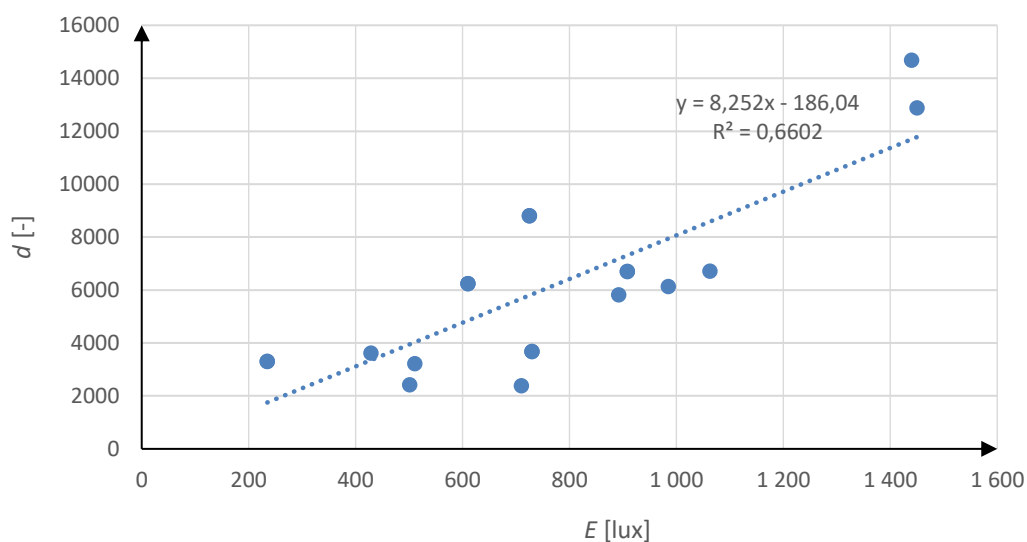
Otrzymany na podstawie pomiarów zbiór funkcji rozkładu natężenia oświetlenia różniących się między sobą w zależności od wartości natężenia światła naturalnego. W celu implementacji systemu sterowania oświetleniem, co opisano w rozdziale 6.2, konieczne jest uzyskanie jednej lub najwyżej kilku formuł, które na podstawie pomiaru z jednego punktu umożliwią sterowanie oświetleniem w całym pomieszczeniu. Jak opisano wcześniej wyznaczono 6 okresów pomiarowych uzależnionych od ruchu Słońca na niebie, zatem postanowiono wyznaczyć też 6 formuł opisujących rozkład natężenia oświetlenia, osobno dla każdego okresu.

W tym celu postanowiono znaleźć zależność wartości wyznaczonych parametrów  $c$  i  $d$  funkcji potęgowej  $y = d \cdot x^c$ , a wartościami natężenia promieniowania słonecznego zmierzonymi w jednym ustalonym punkcie. Wybrano wspomniany wcześniej w rozdziale 6.2 punkt Pr. Na rysunkach 6.10 i 6.11 przedstawiono te zależności dla okresu III.



Rys. 6.10. Graficzne przedstawienie zależności współczynnika  $c$  równania opisującego rozkład natężenia oświetlenia w okresie III w pomieszczeniu od strony S od wartości natężenia oświetlenia w punkcie sterującym  $P_r$

Źródło: [opracowanie własne]



Rys. 6.11. Graficzne przedstawienie zależności współczynnika  $d$  równania opisującego rozkład natężenia oświetlenia w okresie III w pomieszczeniu od strony S od wartości natężenia oświetlenia w punkcie sterującym  $P_r$

Źródło: [opracowanie własne]

Z wykresu 6.10 wynika, że parametr  $c$  nie jest zależny od promieniowania mierzonego przez czujnik  $P_r$ , wobec czego do formuły postanowiono zastosować jego wartość średnią. Natomiast w przypadku parametru  $d$  jego wartość można wyznaczać za pomocą funkcji liniowej postaci:

$$d = a \cdot E_r + b$$

gdzie  $a$  i  $b$  parametry wyznaczone statystycznie za pomocą procedur arkusza kalkulacyjnego, co opisano wcześniej. Przykład dla okresu III przedstawiono na rysunku 6.11.

Zatem ogólna postać formuły implementowanej do systemu, która będzie wyznaczać natężenia oświetlenia będzie miała postać:

$$E(x) = (aE_r + b) \cdot x^c \quad (6.2)$$

gdzie:

$a$ ,  $b$  i  $c$  – parametry wyznaczone statystycznie,

$x$  – odległość od okna [m],

$E_r$  – natężenie oświetlenia mierzone przez czujnik sterujący  $P_r$  [lx].

Formułę (6.2) wyznaczano dla każdego z 6 opisanych okresów. Formuły zawierające wartości parametrów  $a$ ,  $b$  i  $c$ , przedstawiono w tabeli 6.1. Na potrzeby regulacji wystarczy, aby poszczególne formuły odwzorowywały prawidłowo rozkłady rzeczywiste w przedziale natężenia oświetlenia od 0 do 500 lx. Weryfikacja poprawności przedstawionych w tabeli 6.1 formuł została przedstawiona w rozdziale 6.4.

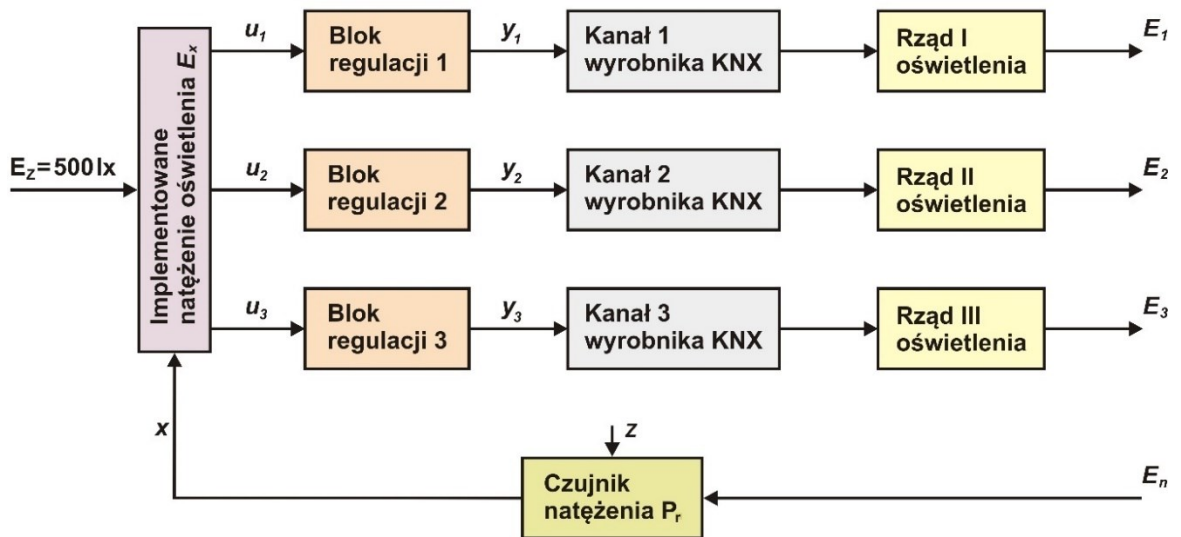
Tabela 6.1. Zestawienie wyznaczonych współczynników funkcji natężenia oświetlenia dla poszczególnych sześciu okresów w roku

*Źródło: [opracowanie własne]*

Okres	Przedział dat	Interpolowane natężenie oświetlenia [ $E_x$ ]
I	21 maja – 20 lipca	$E_1(E_{p4}, x) = (1,686 \cdot E_{p4} + 765,2) \cdot x^{-0,810}$
II	21 kwietnia – 20 czerwca i 21 lipca – 21 sierpnia	$E_2(E_{p4}, x) = (1,729 \cdot E_{p4} + 769,17) \cdot x^{-0,990}$
III	21 marca – 20 kwietnia i 22 sierpnia – 22 września	$E_3(E_{p4}, x) = (2,67 \cdot E_{p4} - 68,179) \cdot x^{-0,796}$
IV	21 lutego – 20 marca i 23 września – 22 października	$E_4(E_{p4}, x) = (2,248 \cdot E_{p4} + 193,62) \cdot x^{-0,823}$
V	21 stycznia – 20 lutego i 21 października – 21 listopada	$E_5(E_{p4}, x) = (2,498 \cdot E_{p4} + 112,79) \cdot x^{-0,875}$
VI	22 listopada – 20 stycznia	$E_6(E_{p4}, x) = (2,167 \cdot E_{p4} + 157,83) \cdot x^{-0,806}$

Schemat blokowy opracowanego układu sterowania oświetleniem został przedstawiony na rysunku 6.12. Formuły opisujące natężenie oświetlenia  $E_x$  przedstawione w tabeli 6.1 wykorzystywane są przez bloki regulacji 1, 2 i 3, które na podstawie danych o natężeniu światła naturalnego mierzonego przez czujnik  $P_r$ , wysyłają informacje o załączeniu lub wyłączeniu

poszczególnych kanałów aktora załączającego odpowiedni rząd oświetlenia w pomieszczeniu. Bloki regulacyjne to układy, które występują w urządzeniu logiczno-arytmetycznym L1, przedstawionym na rysunku 6.2. Obiektem regulacji są poszczególne rzędy opraw oświetleniowych, których praca jest sterowana za pomocą kanałów załączających umieszczonych w wyrobniku WR.



Rys. 6.12. Schemat blokowy opracowanego układu regulacji oświetleniem;  $E_z$  – wartość zadana 500 lx (sygnał zadany),  $E_n$  – wartość natężenia oświetlenia naturalnego (sygnał wejściowy),  $x$  – wartość regulowana (sygnał wyjściowy),  $u$  – uchyb regulacji (sygnał uchybu),  $y$  – wartość sterująca (sygnał sterujący),  $z$  – zakłócenia

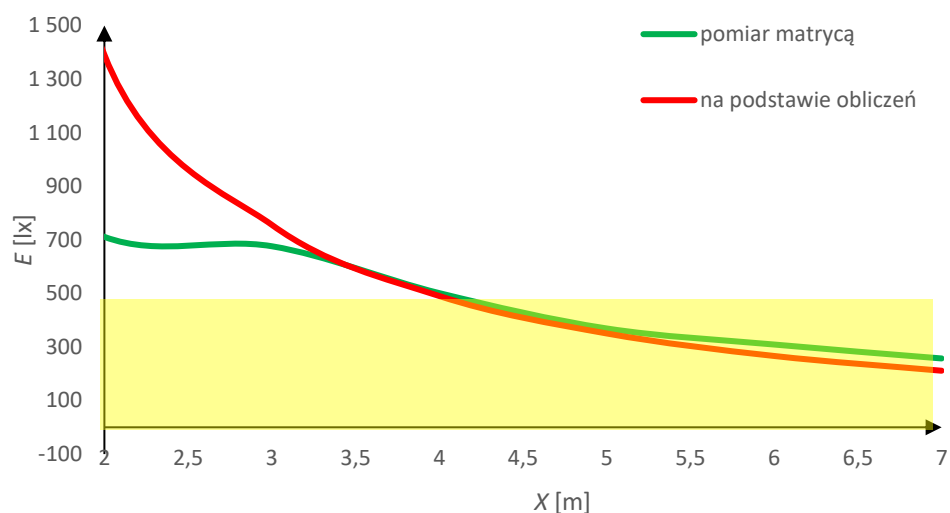
Źródło: [opracowanie własne]

Wartość zadana  $E_z$  wynosi 500 lx. Jest to parametr, na który nie ma wpływu układ regulacji i którego wartość powinna być taka sama na wyjściu układu regulacji. Czujnik natężenia oświetlenia  $P_r$  mierzy rzeczywistą, bieżącą wartość oświetlenia naturalnego docierającego do pomieszczenia i jako wartość regulowaną  $x$  przekazuje do modułu, który ma zaimplementowane pomierzone rozkłady natężenia oświetlenia opisane formułami zestawionymi w tabeli 6.1. Każdy z trzech bloków regulacyjnych otrzymuje sygnał uchybu, wynikający z natężenia oświetlenia mierzonego przez czujnik  $P_r$ , wartości zadanej oraz zaimplementowanych formuł opisujących rozkłady natężenia oświetlenia.

Wartość sterująca  $y$  jest sygnałem, który zostaje wysłany do właściwego kanału aktora sterującego poszczególnymi rzędami opraw oświetleniowych. Uchyb regulacji jest różnicą pomiędzy wartością sygnału zadanego  $E_z$ , a bieżącą wartością pomiaru  $x$ . Zakłóceniami w tym układzie sterowania są zmienne (sygnały) wywierające niekorzystny wpływ na wartość regulowaną  $x$ , tj. warunki atmosferyczne, zacielenia itp.

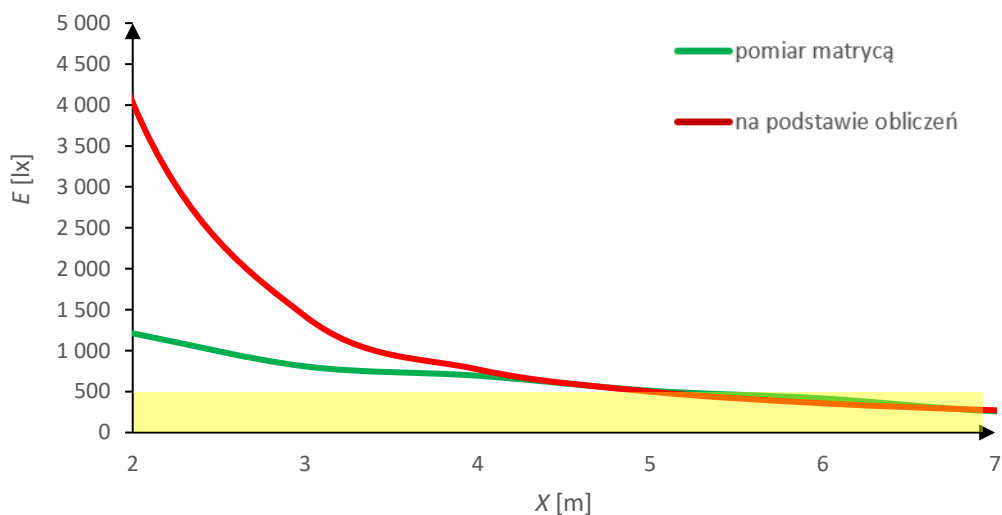
## 6.4. WERYFIKACJA DZIAŁANIA OPRACOWANEGO UKŁADU STEROWANIA OŚWIETLENIEM

W celu weryfikacji poprawności zamodelowanego układu opisanego formułami, dokonano porównania przykładowych rozkładów wyznaczonych na podstawie opracowanych zależności z wynikami otrzymanymi z pomiarów dokonanych przy użyciu matrycy fotometrycznej. Sprawdzenia dokonano w taki sposób, że do formuł opisujących dane rozkłady natężenia światła dziennego wprowadzono jeden z pomiarów zarejestrowanych przez czujnik  $E_r$ . Następnie porównano rozkład natężenia oświetlenia otrzymany z zamodelowanego układu z rozkładem natężenia oświetlenia, wynikającego z pomiaru dokonanego przy użyciu matrycy fotometrycznej. Przykładowe porównania rozkładów natężenia oświetlenia zestawiono na rysunkach 6.13, 6.14 oraz 6.15.



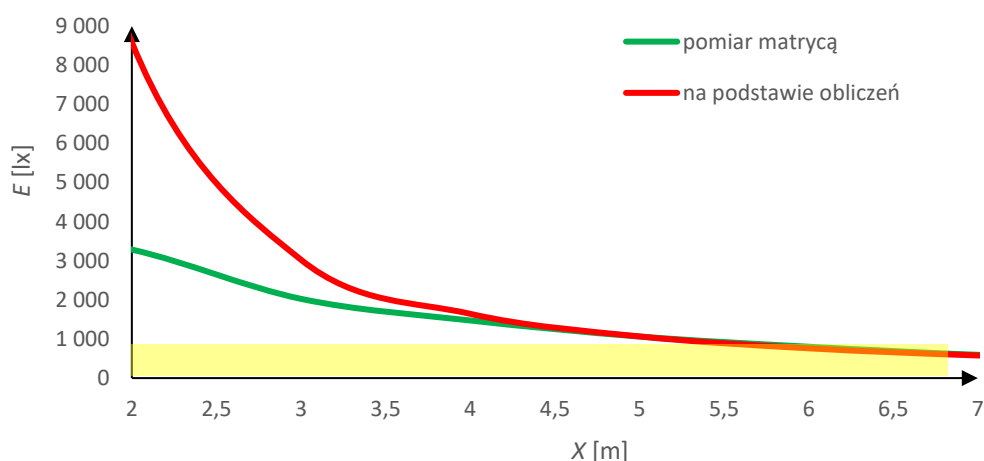
Rys. 6.13. Porównanie obliczonych i zmierzonych rozkładów natężenia oświetlenia w pomieszczeniu od strony S w dniu 16 marca

Źródło: [opracowanie własne]



Rys. 6.14. Porównanie obliczonych i zmierzonych rozkładów natężenia oświetlenia w pomieszczeniu od strony S w dniu 19 kwietnia

Źródło: [opracowanie własne]



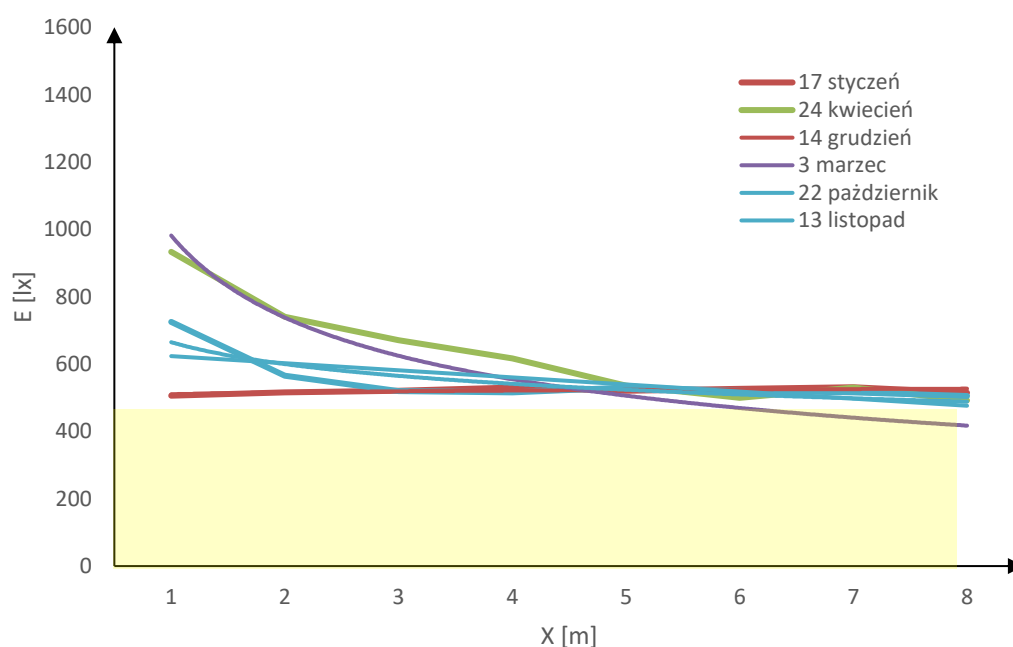
Rys. 6.15. Porównanie obliczonych i zmierzonych rozkładów natężenia oświetlenia w pomieszczeniu od strony S w dniu 18 września

Źródło: [opracowanie własne]

Przeprowadzone pomiary z użyciem matrycy natężenia oświetlenia w pomieszczeniu, w którym zainstalowano system sterowania oświetleniem potwierdziły uzyskanie zakładanego efektu. Czujniki matrycy (opisane w rozdziale 5.3.2), a także czujnik regulujący  $P_r$  (opisany w rozdziale 6.2) zostały dobrane tak, aby rodzaj źródła oświetlenia (lampy żarowe, fluorescencyjne, halogenowe, diodowe) nie wpływały na wartości mierzone, a urządzenia wykonawcze, sterujące poszczególnymi rzędami opraw oświetleniowych dokonywały regulacji mocy oświetlenia sztucznego na podstawie wartości natężenia światła dziennego zmierzonego

przez czujnik P<sub>r</sub>. Uzyskano zbliżone wartości natężenia oświetlenia na całej powierzchni pomieszczenia. Wyznaczone rozkłady natężenia oświetlenia, przedstawione na rysunku 6.16, są wynikiem działania opracowanego systemu sterowania oświetleniem. Z przedstawionych charakterystyk rozkładu natężenia oświetlenia można wywnioskować, że uzyskano równomierne natężenie oświetlenia na całej powierzchni pomieszczenia. Wykresy pokazują, że zaimplementowany system sterowania oświetleniem spełnia swoją funkcję w sytuacji niedostatecznej wartości natężenia światła dziennego w poszczególnych obszarach pomieszczenia. Należy wspomnieć, że opracowany system sterowania dotyczy sytuacji, w których regulacja oświetleniem sztucznym jest realizowana w przypadkach niewystarczającego natężenia światła naturalnego w pomieszczeniu.

W sytuacjach, kiedy do pomieszczenia dociera zbyt duża wartość natężenia światła dziennego trzeba podjąć działania w celu ograniczenia dostępności światła dziennego do wnętrza pomieszczenia, np. poprzez regulację żaluzjami. Należy także zwrócić uwagę, że zbyt duże wartości natężenia światła dziennego w pomieszczeniu nie będą miały wpływu na zmniejszenie zużycia energii elektrycznej w instalacjach oświetleniowych, więc nie były analizowane i brane pod uwagę podczas przeprowadzania badań i pomiarów eksperymentalnych.



Rys. 6.16. Rozkład natężenia oświetlenia z wykorzystaniem sterowania KNX w pomieszczeniu od strony S

Źródło: [opracowanie własne]



## 6.5. OSZCZĘDNOŚCI ENERGII WYNIKAJĄCE Z ZASTOSOWANIA OPRACOWANEGO UKŁADU STEROWANIA OŚWIETLENIEM

Wyniki badań natężenia oświetlenia w pomieszczeniu pozwoliły wyznaczyć rozkłady natężenia światła. Na ich podstawie, na potrzeby analiz ekonomicznych można ustalić wartości kryterialne natężenia światła, dla których powinny być załączane i wyłączane poszczególne rzędy lamp oświetleniowych. Wartości kryterialne mogą przyjmować różne wartości dla tych samych rozkładów w zależności od umiejscowienia czujnika natężenia oświetlenia, który jest wykorzystywany do sterowania oświetleniem. W tabeli 6.2. przedstawiono przykłady rozkładów natężenia oświetlenia zmierzonych dla różnych warunków oświetleniowych panujących na zewnątrz pomieszczenia, co skutkuje różnymi wartościami natężenia oświetlenia na powierzchniach roboczych (blaty ławek).

Tabela 6.2. Wybrane wartości natężenia oświetlenia oraz jego rozkład w sali lekcyjnej od strony południowej

Źródło: [opracowanie własne]

Lp	Warunki	Nat. ośw. zew. [lx]	Nat. ośw. wew. [lx]	Odległość od okna [m]							
				Ez	Ew	0,5	1	2	3	4	5
1	zach. duże	3240	890	756	430	270	235	159	110	75	54
2	słońce, bezchmurne.	5240	950	916	630	530	445	400	389	330	275
3	zach. duże, deszcz	2500	790	725	470	300	230	145	102	72	58
4	zach. małe	7700	1890	1850	1050	770	610	420	285	200	145
5	zach. średnie	7500	1850	1750	980	695	665	300	290	205	160
6	zach. średnie	7800	1750	1700	935	760	570	370	245	190	145
7	zach. średnie	9620	2940	2297	1485	1157	738	656	385	261	204
8	zach. średnie	11180	3420	2520	1730	1269	960	710	489	398	323
9	zach. średnie	10400	2980	2090	1780	1210	980	670	540	420	318
10		9320	2810	2260	1140	1040	960	590	425	300	235
11	zach. średnie	13250	3590	2610	2145	1915	1600	1132	995	690	505
12	zach. małe	17000	8700	3280	2770	2230	1880	1260	1020	730	535

W kolumnach oznaczonych kolorem żółtym znajdują się wartości natężenia poniżej 500 lux, czyli wymaganego natężenia oświetlenia. Analiza przedstawionych rozkładów natężenia oświetlenia pozwoliła ustalić wartości kryterialne, na przykład dla rozkładów przedstawionych w wierszach od 1 do 3 w tabeli 6.2, natężenie oświetlenia wyznaczone już na głębokości 1 m

jest niższe niż 500 lux, co stwarza konieczność załączenia wszystkich rzędów lamp oświetleniowych. Natomiast w sytuacjach przedstawionych za pomocą rozkładu natężenia oświetlenia, prezentowanych w wierszach od 3 do 6, istnieje możliwość wyłączenia I rzędu lamp oświetleniowych. Stąd wynika pierwszy zestaw wartości kryterialnych, które wynoszą odpowiednio:

- dla czujnika natężenia oświetlenia umieszczonego na zewnątrz  $I_o$  – 7000 lux;
- dla czujnika natężenia oświetlenia umieszczonego wewnątrz  $I_{IN}$  – 1200 lux.

Analogicznie wyznaczono kolejne zestawy wartości kryterialnych po przekroczeniu których można wyłączać następne rzędy opraw oświetleniowych, które zestawiono w tabeli 6.3.

Tabela 6.3. Wartości natężenia oświetlenia zewnętrznego i wewnętrznego dla których zostały określone odpowiednie stany pracy opraw oświetleniowych

*Źródło: [opracowanie własne]*

Wartości kryterialne natężenia światła do sterowania rzędami lamp		
Wartość natężenia światła zewnętrznego $E_{xo}$ [lux]	Wartość natężenia światła wewnętrznego $E_{xin}$ [lux]	Stan pracy lamp oświetleniowych
$\leq 7000$	$\leq 1200$	I, II, III rząd - załączony
$\subset 7000 - 9000$	$\subset 1200 - 2300$	I, II rząd - załączony
$\subset 9000 - 12000$	$\subset 2300 - 3500$	I rząd - załączony
$\geq 12000$	$\geq 3500$	I, II, III rząd - wyłączony

Z analizy wyników badań rozkładu natężenia światła w salach lekcyjnych, których przykładowe wartości przedstawiono w tabeli 6.2 wynika, że dla poszczególnych rzędów oświetlenia można określić graniczne wartości natężenia oświetlenia. Dla pierwszego rzędu oświetlenia to 7000 lx, dla drugiego zaś 9000 lx, natomiast dla ostatniego, trzeciego rzędu to 12000 lx.

W związku z tym, że obiekt posiada powtarzalne pomieszczenia o zbliżonych wymiarach i architekturze, zaproponowany system sterowania można zastosować dla poszczególnych kondygnacji, odpowiednich segmentów obiektu. Na rysunku 6.17 przedstawiono ideę sterowania oświetleniem w systemie KNX I piętra skrzydła B w badanym obiekcie. Proponowany system sterowania oświetleniem obejmuje także pomieszczenia, w których były wykonywane pomiary rozkładu natężenia oświetlenia. W salach lekcyjnych proponuje się sterowanie oświetleniem zgodnie z opracowanym układem sterowania z wykorzystaniem jednego czujnika natężenia oświetlenia  $P_r$ . Można rozważyć, po wcześniejszym przetestowaniu, zainstalowanie jednego czujnika natężenia oświetlenia

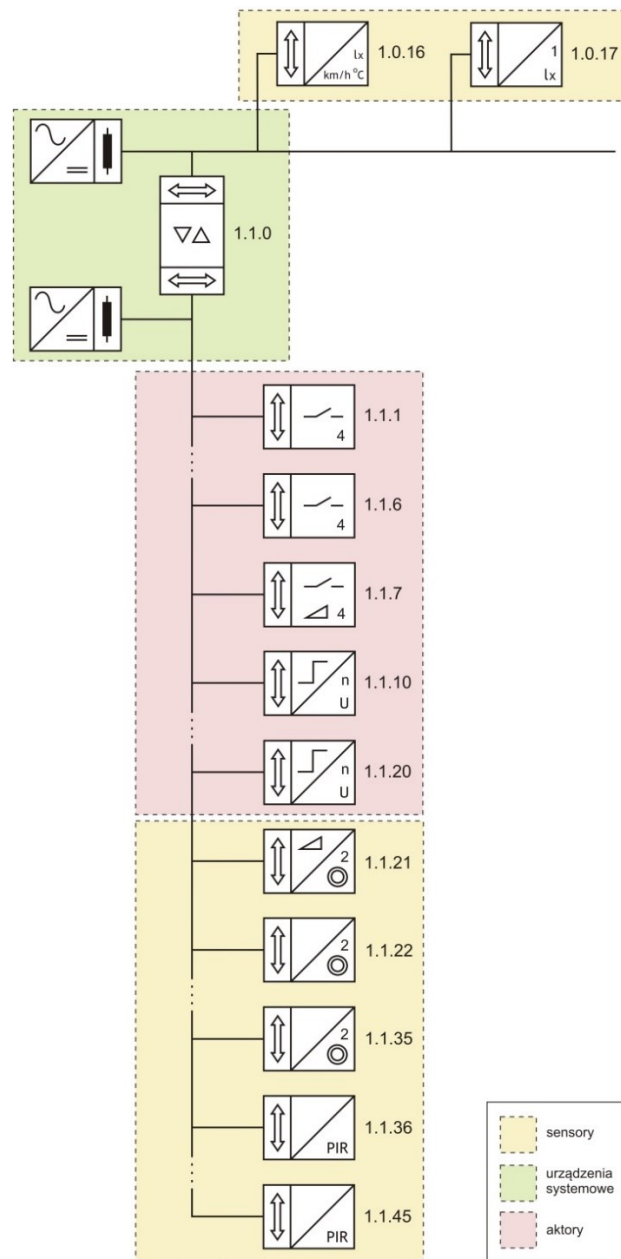
obsługującego więcej niż jedną salę. Taka możliwość istnieje ze względu na zbliżone parametry docierającego światła dziennego do sąsiadujących ze sobą pomieszczeń, położonych na tej samej kondygnacji i po tej samej stronie skrzydła budynku. Natomiast do regulacji oświetleniem świetlówkowym bądź ledowym w pomieszczeniach technicznych i sanitariatach można wykorzystać sterowanie załącz/wyłącz przez aktry załączające wielokanałowe. Warunkiem załączenia oświetlenia w tych pomieszczeniach będzie wartość natężenia światła dziennego mierzona, np. przez stację pogodową i czujnik natężenia światła, umieszczone na elewacji budynku bądź wewnątrz pomieszczenia. Jeżeli wartości natężenia mierzone przez te czujniki będą wyższe od wartości zadanej, wówczas oświetlenie nie zostanie załączone, natomiast przy wartości niższej, oświetlenie w pomieszczeniach zostanie załączone automatycznie. Sterowanie takie wymaga określenia zależności natężenia wewnątrz pomieszczenia od natężenia światła dziennego. Należy przy tym uwzględnić zmienność natężenia spowodowaną chwilowym zachmurzeniem, tak aby uniknąć zbyt częstych przełączeń oświetlenia. W każdym pomieszczeniu zastosować należy przycisk umożliwiający niezależne, ręczne sterowanie oświetleniem. Wejście do pomieszczeń technicznych jest przez sale lekcyjne, dlatego załączenie oświetlenia jest możliwe, np. po włożeniu karty do czytnika przy wejściu do określonej sali lekcyjnej, pod warunkiem, że czujnik natężenia oświetlenia w pomieszczeniu nie wykryje zbyt dużej wartości tego natężenia. Również w tych pomieszczeniach zastosowany będzie przycisk umożliwiający ręczne sterowanie oświetleniem. W ciągach komunikacyjnych (korytarzach) i na klatkach schodowych, które nie mają dostępu do światła dziennego, przewiduje się sterowanie oświetleniem świetlówkowym lub ledowym typu ściemnij/rozjaśnij, którego płynną regulację natężenia w granicach 1-100% realizuje się za pomocą stateczników w systemie 1-10 V. Oświetlenie będzie załączane na 100% mocy w czasie przerw, natomiast podczas zajęć zostanie obniżone automatycznie do zadanej wartości ok. 20% nominalnej wartości mocy. Zastosowane czujniki ruchu będą kontrolowały cały obszar korytarza i po wykryciu ruchu, spowodują rozjaśnienie oświetlenia do wartości maksymalnej. W łazienkach i sanitariatach stosuje się oświetlenie sterowane przez czujniki ruchu PIR pracujące w trybie master-slave. Do sterowania wymagane są dwa czujniki ruchu umieszczone w części z umywalkami i toalecie oraz dwa kanały aktora załączającego. Po wejściu do łazienki z umywalkami czujnik pracujący w trybie slave wykrywa ruch i wysyła telegram do czujnika w toalecie, pracującego w trybie master, który załącza kanał aktora sterujący oświetleniem w łazience. Przejście do toalety powoduje wykrycie ruchu przez czujnik w tym pomieszczeniu i załączenie kanału aktora sterującego oświetleniem tego pomieszczenia oraz wysłanie sygnału do czujnika w łazience, powodującego podtrzymanie załączenia oświetlenia tej łazienki.

Urządzenia magistralne sterujące oświetleniem na każdej kondygnacji podłączone są do oddzielnej linii. Do linii podrzędnych podłączone będą aktry, wejścia binarne, przyciski załączające oświetlenie oraz czujniki ruchu PIR. Stacja pogodowa oraz czujnik natężenia oświetlenia podłączone będą do linii głównej. Urządzeniom magistralnym nadawane są adresy indywidualne w postaci O.L.E., gdzie O oznacza obszar, L – linię i E – numer urządzenia.

W opracowanej topologii linii podrzędnej, aktry załączające i aktor ściemniający umieszczone są w rozdzielnicy i dlatego nadano im numery urządzeń od 1 do 7, natomiast pozostałe urządzenia umieszczone w pomieszczeniach mają numery od 10 do 45. W topologii przedstawionej na rysunku 6.17, ze względu na dużą liczbę aktorów załączających, wejść binarnych, przycisków oraz czujników ruchu, zaznaczono po dwa urządzenia z każdego wymienionego wyżej rodzaju.

Linie podrzędne podłączone są do linii głównej tworząc obszar, w ten sposób  $O = 1$ . Linie podrzędne podłączone są do linii głównej przez sprzęgła liniowe o adresach indywidualnych określonych przez obszar O, w którym się znajdują oraz numer linii L, którą łączą, stąd adres indywidualny sprzęgieł liniowych zapisany jest w formacie O.L.0. Sprzęgła filtrują telegramy i przepuszczają tylko te, które wysyłane są z urządzenia znajdującego się w jednej linii do urządzenia znajdującego się w innej linii w tym samym lub innym obszarze. Stacja pogodowa i czujnik natężenia oświetlenia, umieszczone na elewacji budynku od strony PN i PD, podłączone są do linii głównej. Adresy indywidualne tych urządzeń zapisywane są w formacie O.O.E, to znaczy mają określony numer obszaru, w którym się znajdują oraz numer urządzenia przyłączonego do linii głównej. Stacji pogodowej oraz czujnikowi natężenia oświetlenia przypisano numery 16 i 17, ponieważ numery 1-15 zarezerwowano dla linii podrzędnych. Każda linia podrzędna oraz linia główna wymagają zastosowania zasilacza, ponieważ sprzęgła separują elektrycznie linie.

Z przedstawionej topologii systemu sterowania wynika, że do sterowania oświetleniem, tylko na jednej kondygnacji budynku szkoły, wymagane będzie zastosowanie 10 sterowników DALI (niezależne sterowanie 64 urządzeniami w maksymalnie 32 grupach), 55 wejść binarnych, 56 szt. sensorów/przycisków, 40 szt. czujników natężenia oświetlenia/ruchu oraz trzech sprzęgieł obszarowych i trzech zasilaczy umożliwiających zasilanie 2 linii. Urządzenia te oraz oprogramowanie i uruchomienie instalacji w znaczący sposób zwiększają koszty instalacji oświetleniowej i dlatego ważne jest oszacowanie oszczędności energii, którą można uzyskać instalując sterowanie oświetleniem.

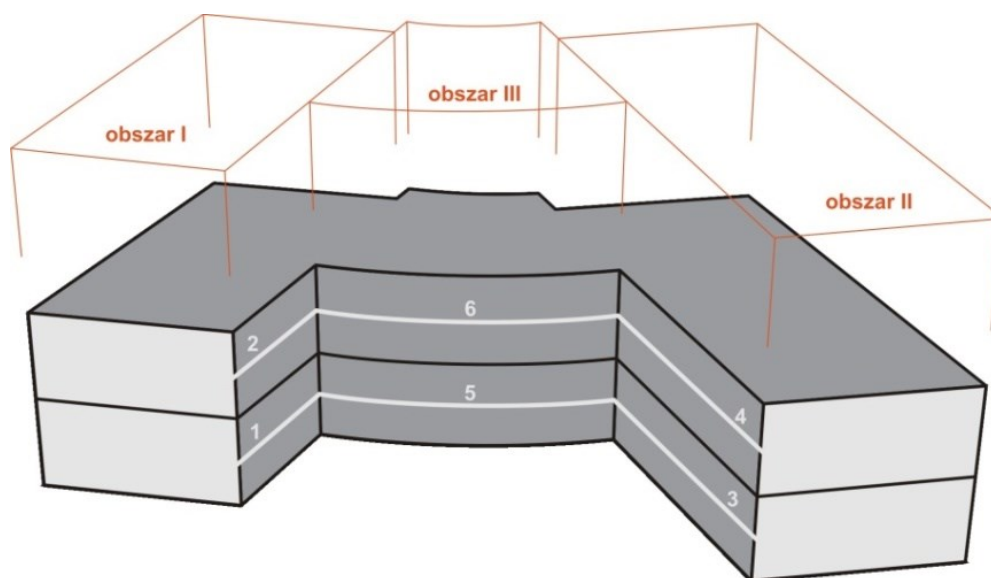


Rys. 6.17. Topologia magistrali systemu sterowania oświetleniem I piętra skrzydła B w standardzie KNX

Źródło: [opracowanie własne]

Wykazane w niniejszym rozdziale oszczędności w zużyciu energii dotyczą całego obiektu edukacyjnego. Zaproponowany system sterowania został oparty o standard automatyki budynkowej KNX. Jednym z kluczowych powodów wyboru takiego systemu jest cyfrowa struktura informacji (telegramów) wykorzystywanych do komunikacji poszczególnych czujników, urządzeń i sensorów. Ułatwia to w znaczący sposób implementację danych otrzymanych z badań rozkładu natężenia oświetlenia do elementów sterujących oświetleniem pomieszczeń. Kolejnym argumentem przemawiającym za wyborem tego standardu jest szeroka

gama producentów oferujących urządzenia działające w tym standardzie, co daje duże możliwości w doborze właściwego sprzętu. Na rysunku 6.18 została przedstawiona struktura całego obiektu edukacyjnego w Swarzędzu, który został dokładnie przedstawiony w rozdziałach 5.2.1 i 5.2.2. Z uwagi na konstrukcję architektoniczną budynku szkoły, która składa się z trzech segmentów 2- kondygnacyjnych, zaproponowano linie obszarowe 1-6 oraz obszary I, II i III. Każdy z trzech segmentów szkoły posiada nieco odmienną funkcję użytkowania. Bliźniacze skrzydła A i B mieszczą sale wykładowe, w skrzydle B przeważają pracownie i laboratoria techniczne. W łączniku zlokalizowana jest aula, duży hol wejściowy oraz pomieszczenia administracyjne. Odmienność funkcjonalna tych segmentów uzasadnia rozdzielenie instalacji sterującej na 3 obszary.



Rys. 6.18. Struktura obiektu ZS nr 1 w Swarzędzu z zaznaczonymi obszarami i magistralami w systemie KNX

*Źródło: [opracowanie własne]*

W celu wykazania zwiększenia efektywności energetycznej instalacji oświetleniowych, dokonano obliczeń, których wyniki, pozwalają na ocenę oszczędności zużycia energii elektrycznej. Analiza zużycia energii elektrycznej w instalacjach oświetleniowych została przeprowadzona w dwóch aspektach.

W pierwszym aspekcie uwzględniono trzy sytuacje, które obejmują obliczenia oszczędności dla wersji bez sterowania, wersji z użyciem czynnika ruchu PIR oraz sterowania z wykorzystaniem czujnika natężenia oświetlenia. W wypadku wersji bez sterowania

oświetleniem została uwzględniona całkowita moc oświetlenia zainstalowanego w poszczególnych pomieszczeniach dydaktycznych oraz łączny czas pracy. Wariant ten zakłada załączanie oświetlenia przy rozpoczęciu korzystania z pomieszczenia i wyłączeniu po zakończonej pracy na koniec dnia. Takie zachowanie użytkowników zaobserwowano podczas przeprowadzonych badań. Drugi rodzaj sterowania zakłada użycie czujnika ruchu PIR do sterowania oświetleniem – I wariant oszczędności. Zapewnia on wyłączenie oświetlenia podczas nieobecności użytkowników w sali np. w czasie przerw. Załączanie i wyłączenie oświetlenia jest realizowane z wykorzystaniem jednego lub kilku czujników ruchu PIR. W przeprowadzonych obliczeniach założono, że wszyscy użytkownicy w czasie przerw opuszczają pomieszczenia. Trzeci rodzaj sterowania, zakłada sterowanie oświetleniem przy użyciu danych z czujnika natężenia oświetlenia, który przekazując pomierzone wartości przekazuje dane do modułu wykonawczego. Moduł wykonawczy posiada wprowadzone dane z pomiarów natężenia oświetlenia na całej głębokości sali, co pozwala na efektywne sterowanie poszczególnymi rzędami lamp, z wykorzystaniem funkcjonalności systemu KNX – II wariant oszczędności. W tym sposobie sterowania oświetleniem realizowane jest załączanie i wyłączenie poszczególnych rzędów oświetlenia przy odpowiednim natężeniu światła dziennego. Sterowanie w tym wariantcie oszczędności odbywa się z wykorzystaniem danych rozkładów natężenia oświetlenia przedstawionych w rozdziale 5.4, które zostają użyte do sterowania oświetleniem z wykorzystaniem układów systemu KNX opisanych w rozdziale 2.3.2.6.

W drugim aspekcie uwzględniono sposób użytkowania pomieszczeń dzieląc je na grupy o podobnych funkcjach użytkowych:

- korytarze, ciągi komunikacyjne i schody;
- pomieszczenia dydaktyczne – wykładowe, pracownie warsztatowe i laboratoria;
- sanitariaty;
- pomieszczenia techniczne, w tym zaplecza dla wykładowców;
- pomieszczenia administracyjne.

Na korytarzach i ciągach komunikacyjnych, klatkach schodowych, założono, że oświetlenie podczas trwania zajęć dydaktycznych, ściemnia się automatycznie do 20% mocy. To założenie dotyczy zarówno I jak i II wariantu oszczędności. W celu zapewnienia wymaganego przepisami, natężenia oświetlenia, zastosowane są czujniki ruchu PIR, które w przypadku pojawienia się użytkownika, włączą pełną moc oświetlenia. W salach wykładowych, pomieszczeniach administracyjnych i technicznych, przyjęto czas użytkowania

9 godzin dziennie. Korytarze i ciągi komunikacyjne na 12 godzin. Natomiast sanitariaty na 11 godzin. Przyjęty czas pracy został założony na podstawie harmonogramu czasu pracy w poszczególnych pomieszczeniach oraz na podstawie wielomiesięcznych, bezpośrednich obserwacji autora. Tabela 6.4 przedstawia szczegółowe kryteria przyjęte dla trzech wersji sterowania oświetleniem. Pierwszy sposób zakłada ręczne załączanie i wyłączenie oświetlenia, czyli nie posiada automatyki sterującej. Natomiast kolejne wersje są wariantami, w których wykorzystywane są elementy sterowania automatycznego i wprowadzają oszczędności w zużyciu energii. Wykorzystanie światła dziennego uwzględniono przede wszystkim w salach lekcyjnych, pomieszczeniach technicznych oraz w mniejszym stopniu w sanitariatach. W przypadku pomieszczeń administracyjnych oraz korytarzy uwzględniono pełną moc oświetlenia sztucznego przez cały czas pracy szkoły. Korytarze nie posiadają dostępu światła dziennego, więc można zaproponować oszczędności w postaci zmniejszenia natężenia oświetlenia podczas nieobecności użytkowników. Natomiast powierzchnia łącznika zarówno na parterze, jak i na piętrze jest od strony południowo-zachodniej całkowicie oszklona, co zapewnia dobry dostęp światła dziennego przez cały dzień. W tych strefach można byłoby także zastosować II wariant oszczędności i zmniejszyć moc źródeł oświetlenia lub przy zapewnieniu wystarczającego natężenia światła dziennego, całkowicie wyłączyć oprawy oświetleniowe. Taką możliwość potwierdzają pojedyncze badania natężenia światła dziennego przeprowadzone w tych miejscach. Ze względu na niewielką ilość zainstalowanych opraw oświetleniowych oraz bardzo duży, ciągły ruch w tym obszarze, zdecydowano nie ujmować tych powierzchni w obliczeniach I i II wariantcie oszczędności.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń zużycia energii elektrycznych w poszczególnych pomieszczeniach, z uwzględnieniem różnych wariantów sterowania, otrzymano dane oszczędności w zużyciu energii elektrycznej w instalacjach oświetleniowych dla całego obiektu edukacyjnego. Otrzymane wyniki dowodzą, że wprowadzenie sterowania z użyciem czujników obecności PIR dla wskazanych pomieszczeń pozwoli na ograniczenie w zużyciu energii elektrycznej na poziomie nieco ponad 1000 kWh w skali miesiąca. Wprowadzając kolejny II wariant sterowania, który zakłada użycie czujników natężenia oraz regulację oświetleniem z uwzględnieniem rozkładu natężenia światła dziennego w pomieszczeniach, wówczas oszczędności wzrastają o blisko 2000 kWh.



Tabela 6.4. Obliczenia oszczędności energii w różnych wariantach sterowania

Źródło: [opracowanie własne]

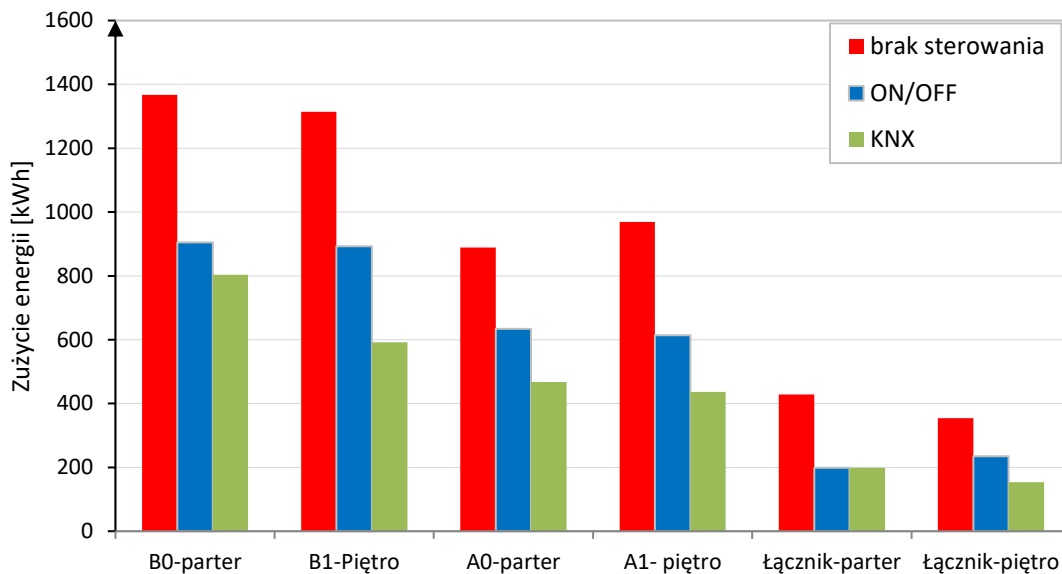
Pomieszczenie	Σ mocy zainstalowana [W]	Dni pracy w XII	Bez sterowania		Warianty oszczędności			
			Czas [h]	Energia [Wh]	I (ON / OFF)		II (KNX)	
					Czas [h]	Energia kWh	Czas [h]	Energia kWh
<b>B0 – parter</b>								
Korytarze, klatki schodowe	1332	16	12	255,774	1,5	31,968	1,5	31,968
					10,5 (20%)	223,776	10,5 (20%)	223,776
Sale lekcyjne	3312	16	9	476,928	7,5	397,440	4,5	238,464
WC	1260	16	11	221,76	6	120,960	5	100,800
Pom. tech.	336	16	9	48,384	7,5	40,320	4,5	24,192
Pom. admin.	2520	16	9	362,88	9	362,880	9	362,880
<b>RAZEM</b>	<b>8760</b>			<b>1365,726</b>		<b>1177,344</b>		<b>982,080</b>
Oszczędność	[kWh]					<b>188,382</b>		<b>382,926</b>
<b>B1 – piętro</b>								
Korytarze, klatki schodowe	1512	16	12	290,304	1,5	36,288	1,5	36,288
					10,5 (20%)	50,803	10,5 (20%)	50,803
Sale lekcyjne	5472	16	9	787,968	7,5	656,640	4,5	393,984
WC	940	16	11	165,44	3,5	90,240	3,5	75,200
Pom. tech.	492	16	9	70,848	7,5	59,040	4,5	35,424
<b>RAZEM</b>	<b>8416</b>			<b>1314,56</b>		<b>893,038</b>		<b>612,601</b>
Oszczędność	[kWh]					<b>421,522</b>		<b>701,959</b>
<b>A0 – parter</b>								
Korytarze, klatki schodowe	864	16	12	165,888	1,5	20,736	1,5	20,736
					10,5 (20%)	145,152	10,5 (20%)	145,152
Sale lekcyjne	2736	16	9	393,984	7,5	328,320	4,5	196,992
WC	660	16	11	116,16	6	63,360	5	52,800
Pom. tech.	1704	16	9	245,376	7,5	204,480	4,5	122,688
Pom. admin.	432	16	8	55,296	8	55,296	8	55,296
<b>RAZEM</b>	<b>6396</b>			<b>976,704</b>		<b>796,608</b>		<b>593,664</b>
Oszczędność	[kWh]					<b>180,024</b>		<b>383,040</b>
<b>A1 – piętro</b>								
Korytarze, klatki schodowe	1080	16	12	207,36	1,5	25,920	1,5	25,920
					10,5 (20%)	181,440	10,5 (20%)	181,440
Sale lekcyjne	3600	16	9	518,4	7,5	432,000	4,5	259,200
WC	880	16	11	154,88	6	84,480	5	70,400
Pom. tech.	616	16	9	88,704	7,5	73,920	4,5	44,352
<b>RAZEM</b>	<b>6176</b>			<b>969,344</b>		<b>797,760</b>		<b>581,312</b>
Oszczędność	[kWh]					<b>171,584</b>		<b>388,032</b>
<b>D- Łącznik – parter</b>								
Hall, komunikacja	1712	16	12	328,704	1,5	41,088	1,5	41,088
					10,5 (20%)	287,616	10,5 (20%)	287,616
Portiernia	144	16	16	36,864	16	36,864	16	36,864
Sklepek	360	16	11	63,36	11	63,360	11	63,360
<b>RAZEM</b>	<b>2216</b>			<b>428,928</b>		<b>428,928</b>		<b>428,928</b>
Oszczędność	[kWh]					<b>0,00</b>		<b>0,00</b>
<b>D- Łącznik – piętro</b>								
Korytarz	560	16	12	107,52	1,5	13,440	1,5	13,440
					10,5 (20%)	94,080	10,5 (20%)	94,080
Aula	1686	16	9	242,784	7,5	202,320	4,5	121,392

RAZEM	2246		350,304		309,840		228,912
Oszczędność	[kWh]				40,464		121,392

Dane, na podstawie których dokonano analizy zużycia i oszczędności energii elektrycznej w instalacjach oświetleniowych, zawarte zostały w tabeli 6.4. Dla ułatwienia, zwiększenia przejrzystości i czytelności obliczeń, wyodrębniono poszczególne segmenty obiektu wraz z wyszczególnieniem kondygnacji. Rozdzielono także pomieszczenia pod względem funkcjonalnym na sale lekcyjne, pomieszczenia techniczne (zaplecza), sanitariaty, także pomieszczenia administracyjne i inne. Podziału takiego dokonano ze względu na zróżnicowany charakter pracy w poszczególnych pomieszczeniach, a także ze względu na ich przeznaczenie użytkowe. Taki podział pomieszczeń ze względu na ich sposób użytkowania jest także przydatny do analizy i obliczeń, które uwzględniają właśnie sposób użytkowania pomieszczeń, jak o główne kryterium.

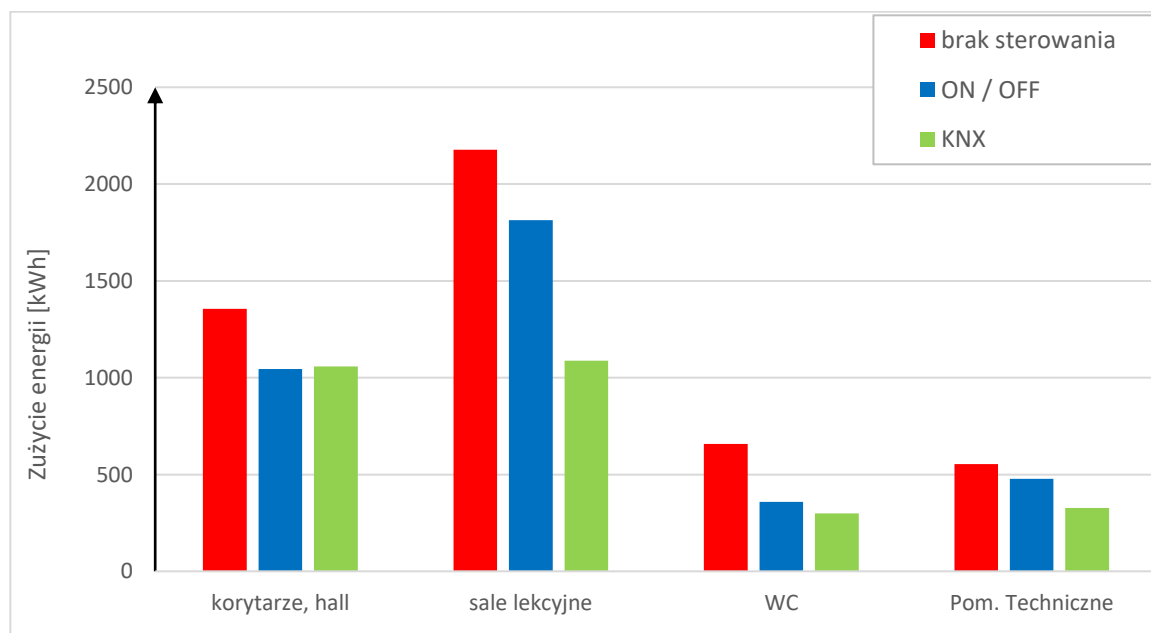
Łączne zużycie energii elektrycznej na oświetlenie pomieszczeń w obiekcie w miesiącu grudniu oszacowano na 5107,49 kWh. Zużycie energii w tych samych instalacjach w I wariantcie oszczędności wyniosłoby 4059,09 kWh, co oznacza mniejsze zużycie o **20,53%**, natomiast w wariantcie II 3135,83 kWh, co wprowadza oszczędności na poziomie **36,7%** w porównaniu ze zużyciem energii bez sterowania oświetleniem. Sumaryczna szacowana oszczędność w zużyciu energii elektrycznej w instalacjach oświetleniowych budynku przy zastosowaniu I wariantu sterowania przyniosłaby oszczędność w kwocie 789 zł, a wariant II sterowania oświetleniem pozwoliłby zaoszczędzić 1485 zł w analizowanym miesiącu grudniu (przy zakładanych kosztach energii elektrycznej na poziomie 753 zł/MWh).

Na rysunku 6.19 przedstawiono zużycie energii elektrycznej w miesiącu grudniu, w instalacjach oświetleniowych, z podziałem na poszczególne części obiektu szkoły. Na każdym z wykresów pokazano zużycie energii elektrycznej dla trzech wspomnianych wariantów sterowania. Można zauważyć, że zużycie energii elektrycznej w instalacjach oświetleniowych w przypadku sterowania z wykorzystaniem światła dziennego jest blisko o 40% mniejsze, niż w przypadku braku sterowania. Natomiast rysunek 6.20 przedstawia zużycie energii w całym obiekcie, także w miesiącu grudniu, z uwzględnieniem różnych funkcji pomieszczeń. Z wykresu wynika, że największe oszczędności w zużyciu energii elektrycznej na oświetlenie można uzyskać w salach lekcyjnych, w których można wykorzystać do oświetlenia światło dzienne. Podobnie jest w pomieszczeniach technicznych, tj. zapleczach oraz sanitariatach. Niewielkie różnice w zużyciu energii elektrycznej w ciągach komunikacyjnych, korytarzach wynikają z braku dostępu światła dziennego w tych przestrzeniach.



Rys. 6.19. Zużycie energii w poszczególnych segmentach budynku dla różnych wariantów sterowania (wariant I – sterowanie ON/OFF, wariant II – sterowanie w systemie KNX, wykorzystujące światło dzienne)

Źródło: [opracowanie własne]



Rys. 6.20. Zużycie energii w poszczególnych grupach pomieszczeń dla różnych wariantów sterowania

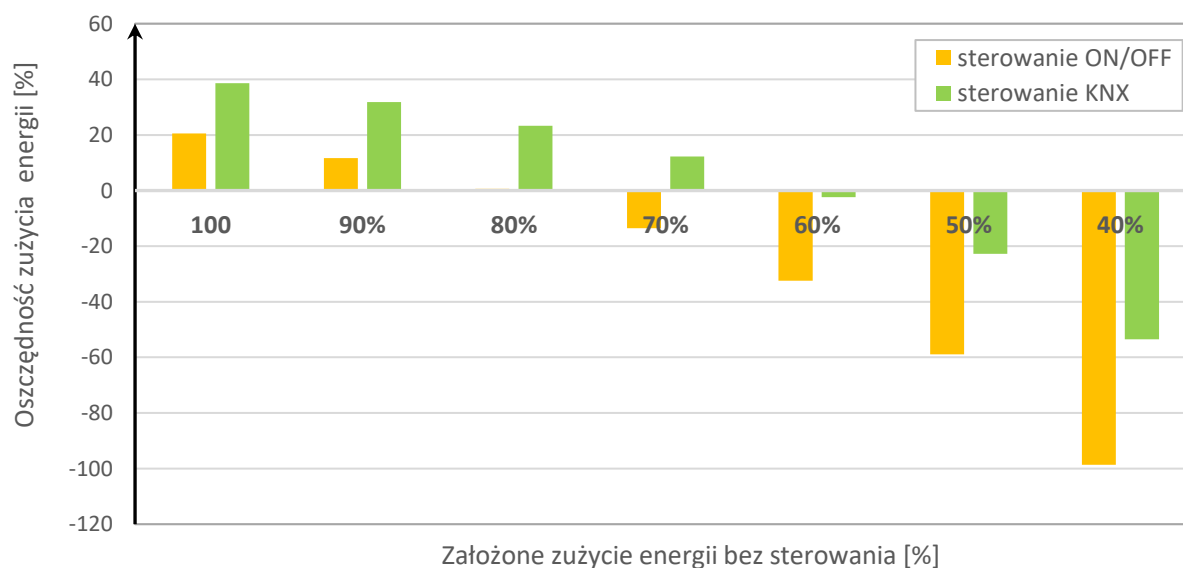
Źródło: [opracowanie własne]

Na rysunkach 6.21 i 6.22 przedstawiono uzyskane oszczędności energii podane w jednostkach względnych dla sterowania ON/OFF i dla sterowania KNX, odpowiednio dla dwóch scenariuszy:

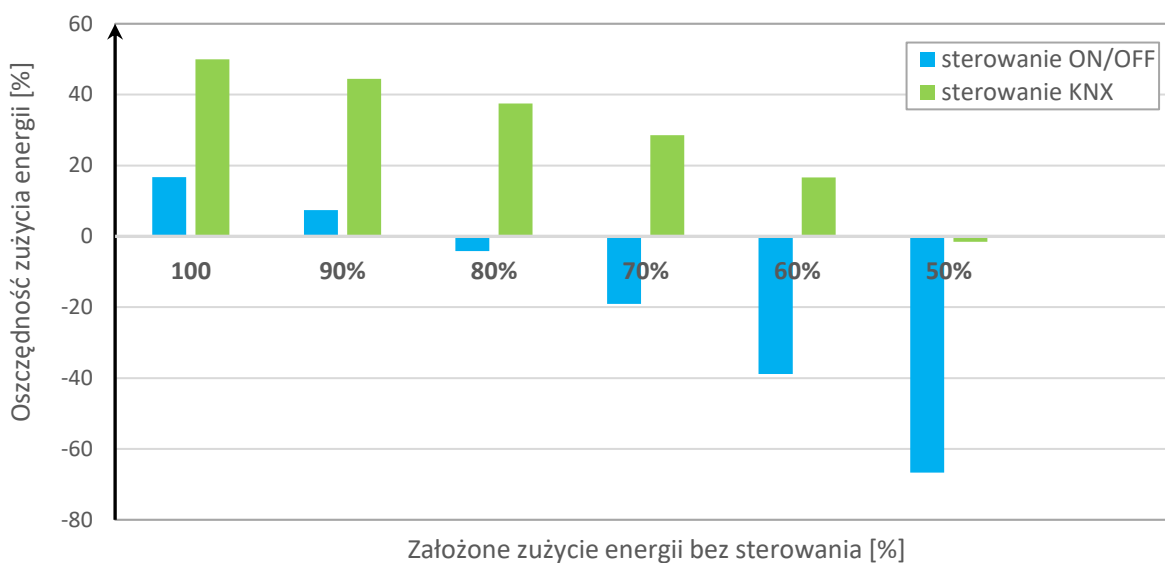
- scenariusz I opisuje oszczędności uzyskane dla całego obiektu;
- scenariusz II opisuje oszczędności uzyskane tylko w salach lekcyjnych.

Oszczędność energii w miesiącu grudniu obliczono względem energii, jaka zostałaby zużyta w wariancie bez sterowania w sytuacjach, w których użytkownicy obiektu korzystają z oświetlenia sztucznego na różne sposoby. Na przykład założone zużycie energii bez sterowania na poziomie 100% oznacza, że oświetlenie sztuczne jest załączone przez cały czas pracy obiektu. Niższe wartości założonego zużycia energii oznaczają, że użytkownicy okresowo wyłączają oświetlenie redukując zużycie energii od poziomu 90% do 40%. Zarówno w wypadku scenariusza I, jak i II, sterowanie przy użyciu systemu KNX daje większe oszczędności, niż sterowanie typu ON/OFF.

W publikacji [29] wykazano, że w budynkach użyteczności publicznej, jakimi są budynki edukacyjne, w których nie zastosowano automatycznych systemów sterowania oświetleniem zużycie energii w instalacjach oświetleniowych jest bliskie energii wynikającej z pełnego wykorzystania mocy wszystkich zainstalowanych źródeł oświetlenia sztucznego. Oznacza to, że użytkownicy w większości przypadków nie wyłączają oświetlenia, kiedy jest ono zbędne. Zatem w wypadku, kiedy nie ma automatycznego sterowania oświetleniem osiągnięcie oszczędności na poziomie, np. 20% jest bardzo trudne. Natomiast zarówno w scenariuszu I jak



Rys. 6.21. Zależność uzyskanych oszczędności zużycia energii od założonego zużycia bez sterowania dla sterowania typu ON/OFF i sterowania KNX w scenariuszu I



Rys. 6.22. Zależność uzyskanych oszczędności zużycia energii od założonego zużycia bez sterowania dla sterowania typu ON/OFF i sterowania KNX w scenariuszu II

Źródło: [opracowanie własne]

i II wykazano większe oszczędności. W przypadku scenariusza I (rys. 6.21), sterowanie KNX umożliwia osiągnięcie oszczędności dla założonego zużycia energii bez sterowania powyżej 60%. W przypadku scenariusza II (rys. 6.22) uzyskuje się jeszcze lepsze efekty – oszczędności wystąpią w wypadkach, kiedy założone zużycie energii bez sterowania przekroczy 50%.

Drugim z istotnych aspektów modernizacji instalacji oświetleniowych w obiekcie jest jej efekt ekologiczny, czyli obniżenie emisji CO<sub>2</sub>. Jest ono wynikiem zmniejszenia zużycia energii po modernizacji. Wykazanie takiego efektu jest jednym z niezbędnych elementów audytu energetycznego. W celu określenia wielkości redukcji emisji CO<sub>2</sub> wykorzystano dane z Krajowego Ośrodka Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBiZE), w którym określono szczegółowo współczynniki redukcji emisji CO<sub>2</sub> w zależności od paliwa bądź źródła energii, z którego dana instalacja lub urządzenie korzysta [63]. Współczynnik redukcji CO<sub>2</sub> dla energii elektrycznej pochodzącej z sieci elektroenergetycznej WE = 778 kg/MWh. Wobec tego w rozpatrywanym obiekcie edukacyjnym, dla wariantu I przyjętego systemu sterowania redukcja emisji CO<sub>2</sub> wynosi 779,5 kg. Natomiast stosując wariant II, ograniczenie emisji CO<sub>2</sub> do atmosfery, wynosi 1539 kg.

## 6.6. ANALIZA EKONOMICZNA WDROŻENIA INTELIGENTNEGO SYSTEMU KNX DO STEROWANIA OŚWIETLENIEM

Podstawowym efektem proponowanej modernizacji, implementacji systemu sterowania oświetleniem jest obniżenie zużycia energii. Działania polegające na obniżeniu kosztów zużycia energii muszą być przede wszystkim atrakcyjne finansowo pod względem opłacalności dokonywanych zmian. Decyzja o podjęciu inwestycji modernizacyjnej podejmowana powinna być wówczas, gdy łączna suma wartości dodatnich, korzyści wynikających z projektu, będzie większa od związanych z nim, inwestycją wydatków. Stosuje się różnego rodzaju wskaźniki efektywności ekonomicznej. Zgodnie z zaleceniami UNIDO obliczać należy przynajmniej wartości takich wskaźników jak:

- prosty czas zwrotu nakładów *SPBT* (*Simply Pay Back Time*);
- czas zwrotu nakładów *PBT* (*Pay Back Time*);
- wartość bieżąca netto *NPV* (*Net Present Value*);
- wskaźnik wartości bieżącej netto *NPVR* (*Net Present Value Ratio*);
- wewnętrzna stopa zwrotu *IRR* (*Internal Rate of Return*);
- dynamiczny (zdyskontowany) czas zwrotu nakładów *DPBT* (*Dynamic Pay Back Time*).

Do analizy zestawiono wielkości nakładów inwestycyjnych, w oparciu o aktualne ceny elementów i urządzeń systemu sterowania oświetleniem opartego na standardzie KNX. Oszacowano przewidywane oszczędności w kosztach zakupu energii elektrycznej oraz prosty okres zwrotu nakładów inwestycyjnych. Okres zwrotu jest to czas, w którym korzyści z realizacji zastosowanego systemu sterownia wyrównają się z poniesionymi na jego realizację kosztami inwestycji. Przyjęto, że miarą efektywności ekonomicznej jest prosty okres zwrotu z inwestycji *SPBT*. Metodę tę stosuje się w modernizacjach o spodziewanym szybkim efekcie zwrotu (do najwyżej kilku lat). Określony jest on jako stosunek kosztów inwestycyjnych do korzyści, wyrażonych w postaci rocznej wartości zaoszczędzonej energii.

$$SPBT = \frac{K_{INW}}{K_E} \quad [-] \quad (6.3)$$

gdzie:

- $K_{INW}$  – koszty poniesione z tytułu modernizacji na jej początku wyrażone w jednostce pieniądza [PLN],
- $K_E$  – wartość stałych rocznych oszczędności netto wynikłych z tytułu modernizacji [PLN/rok].

Do oszacowania kosztów potrzebnych na modernizację systemu sterowania oświetleniem w jednostce edukacyjnej, w której wykonywano badania i obliczenia oszczędności, przyjęto koszty modernizacji wg zestawienia przedstawionego w tabeli 6.4.

Tabela 6.4. Zestawienie elementów i kosztów modernizacji systemu sterowania oświetleniem w badanym obiekcie

Źródło: [opracowanie własne]

Nazwa sprzętu / usługi	Ilość / czas szt. / [h]	Koszt całkowity netto $K_{INW}$ [zł]
Sterownik DALI KNX	10 szt.	17500
Zasilacz KNX z dławikiem 640 mA	3 szt.	4500
Sprzęgło obszarowe	3 szt.	3750
Wyłączniki / sensory KNX	56 szt.	8400
Czujnik natężenia światła dziennego	40 szt.	6 800
Usługa montażu	50 h	4000
	<b>Razem</b>	<b>44 950</b>

Biorąc pod uwagę dane z tabeli 6.4, szacunkowe oszczędności w zużyciu energii elektrycznej na oświetlenie, w skali roku, w wariantcie I wynoszą 1048 kWh, natomiast w wariantcie II 1972 kWh. Przyjmując uśrednioną cenę energii dla jednostek samorządu terytorialnego na poziomie 785 zł/MWh, oznacza łączną roczną oszczędność w wariantcie II w miesiącu grudniu na poziomie 1548 zł. Dla obliczenia przyjęto koszt całkowity netto  $K_{INW} = 44950$  zł (tabela 6.4). W celu oszacowania uzyskanych oszczędności rocznych  $K_E$  przyjęto wartość stałych rocznych oszczędności netto  $K_E = 8000 =$  zł/rok. W szacowaniu tej wartości odliczono czas, kiedy obiekt nie funkcjonuje, jak np. okres wakacji, ferii oraz pozostałych dni wolnych od zajęć. Obliczenia mają charakter orientacyjny i poglądowy. Obliczając ze wzoru (6.3) prosty okres zwrotu inwestycji otrzymujemy:

$$SPBT = \frac{44950}{8000} = 5,61 \text{ lat}$$

W celu wykonania pełnej analizy ekonomicznej wykorzystano następujące wskaźniki:

1. Wartość bieżąca netto  $NPV$  będąca sumą wszystkich zdyskontowanych przepływów pieniężnych pomniejszoną o wartość inwestycji. Dzięki uwzględnieniu zmiany pieniądza w czasie metoda pozwala na rzetelne określenie rentowności inwestycji:

$$NPV = \sum_{i=1}^N \frac{C F_i}{(1+r)^n} - I_0 \quad [\text{zł}] \quad (6.4)$$

gdzie:

$CF_i$  – przepływy pieniężne (*cash flows*) to wszystkie przepływy, które zostaną wygenerowane przez inwestycje w przyszłości, np. oszczędności jakie uzyskane zostaną rocznie poprzez zainstalowanie systemu generacji energii elektrycznej;

$I_0$  – wartość nakładów początkowych (*initial outlay*) to środki finansowe wymagane do realizacji inwestycji;

$r$  – wymagana stopa zwrotu (*required rate of return*) to stopa zwrotu wymagana przez inwestora; jej wartość ustalana jest często jako średnie oprocentowanie lokat bankowych;

$N$  – liczba okresów (*numer of periods*) np. lat analizy.

2. Indeks rentowności  $PI$  (*Profitability Index*) określa koszty i korzyści proponowanego projektu i wyznaczany jest jako stosunek wartości bieżących oczekiwanych przepływów pieniężnych w  $N$  okresach i wartości nakładów początkowych:

$$PI = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{CF_i}{(1+r)^i}}{I_0} \quad [-] \quad (6.5)$$

3. Zdyskontowany okres zwrotu  $DPP$  (*Discounted Payback Period*) określa liczbę okresów, po której suma zdyskontowanych przepływów pieniężnych netto będzie równa zero:

$$DPP = N + \frac{|NPV|}{CF_i} \quad [-] \quad (6.6)$$

gdzie:

$N$  – liczba okresów przy której  $NPV$  jest ujemne, ale bliskie 0,

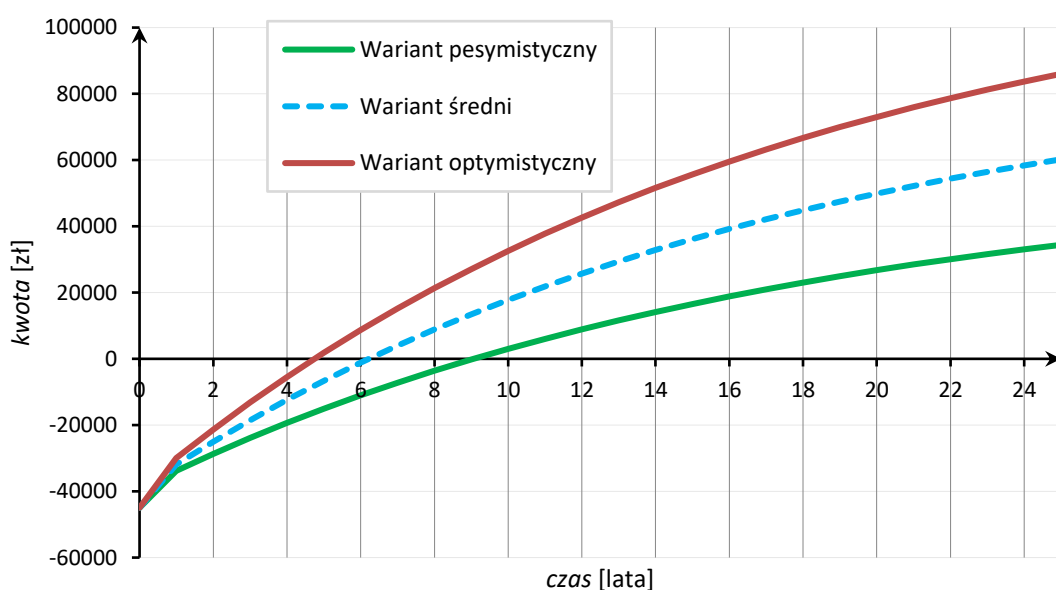
$NPV$  – wartość  $NPV$  ujemna, ale najbliższa 0,

$CF_i$  - wartość przepływów pieniężnych w pierwszym okresie o dodatnim  $NPV$

Na podstawie danych Komisji Europejskiej o stopach referencyjnych i dyskontowych do obliczeń przyjęto stopę dyskontową o wartości  $r = 5,85\%$ , co stanowi średnią z dwóch składników – średniej dla roku 2024 dla wszystkich państw UE ( $r = 4,2\%$ ) oraz wartości bazowej z okresu 1.01.2023 - 31.10.2023 dla Polski ( $r = 7,5\%$ ).



Przedstawione obliczenia dotyczą modernizacji instalacji oświetleniowej w istniejącym obiekcie edukacyjnym, w którym były przeprowadzane badania i pomiary. W nowo projektowanych budynkach, koszty zastosowania systemu sterowania oświetleniem będą niższe ze względu na możliwości wykonania odpowiednich połączeń oraz obwodów zasilania i sterowania jeszcze na etapie początkowym inwestycji. Ponadto dobór odpowiednich opraw oświetleniowych i ich usytuowanie będzie bardziej odpowiednie, co w konsekwencji wpłynie na większą efektywność energetyczną. Na rysunku 6.23 przedstawiono wykresy czasu zwrotu poniesionych kosztów na wykonanie modernizacji systemu sterowania w badanym obiekcie. Przedstawiono 3 warianty czasu zwrotu inwestycji od optymistycznego, dla którego okres zwrotu wynosi niewiele ponad 4 lata, do pesymistycznego, w którym modernizacja zwróci się po okresie blisko 9 lat. Zestawiając i porównując wyniki obliczeń prostego czasu zwrotu *SPBT* oraz pełnej analizy metodą *NPV*, można wywnioskować, że czas zwrotu uzyskany w obliczeniach metodą prostą pokrywa się z czasem zwrotu w wariantcie optymistycznym, uzyskanym metodą *NPV* i wynosi około 4,5 roku.



Rys. 6.23. Czas zwrotu modernizacji systemu sterowania w badanym obiekcie dla trzech wariantów otrzymany z wykorzystaniem metody *NPV*

Źródło: [opracowanie własne]

## 7. PODSUMOWANIE WYNIKÓW PRACY

Poprawa efektywności energetycznej obiektów jest kluczowym wyzwaniem w dobie znaczących wzrostów cen energii elektrycznej i ciepła oraz braku stabilności i przewidywalności funkcjonowania sektora energetycznego. W niniejszej pracy autor ukierunkował swoje badania na poprawę efektywności energetycznej instalacji elektrycznych w obwodach oświetleniowych. Jednym ze sposobów na ograniczenie zużycia energii elektrycznej w obwodach oświetleniowych jest zastosowanie systemu sterowania oświetleniem wykorzystującego światło naturalne. Standardowe układy sterujące oświetleniem sztucznym wykorzystują tylko informacje z czujników natężenia oświetlenia i na podstawie tych danych regulują natężenie oświetlenia sztucznego. Sposób ten posiada szereg wad. Począwszy od trudności z odpowiednią lokalizacją czujników natężenia oświetlenia, poprzez duże trudności, a często brak możliwości, uzyskania równomiernego oświetlenia całej powierzchni pomieszczenia. Brak wiedzy o rozkładzie natężenia oświetlenia w pomieszczeniu, praktycznie uniemożliwia sterowanie oświetleniem sztucznym w sposób zapewniający równomierne natężenie oświetlenia, które oprócz oczywistego komfortu użytkowania przynosi znaczne oszczędności w zużyciu energii elektrycznej. Autor wykorzystując zgromadzone dane o rozkładach natężenia oświetlenia w pomieszczeniach zaimplementował innowacyjny system sterowania źródłami światła sztucznego, którego zadaniem jest zapewnienie wymaganej minimalnej wartości natężenia oświetlenia na całej powierzchni pomieszczenia. Jednocześnie zastosowanie tego systemu zapewnia uzyskanie oszczędności elektrycznej, co wpływa na poprawę efektywności energetycznej budynku.

W celu wyznaczenia rozkładów natężenia oświetlenia w analizowanych pomieszczeniach opracowano i zbudowano matrycę bazującą na czujnikach fotoelektrycznych, która zapewnia wykonanie pomiarów jednocześnie w szesnastu punktach. Matryca została sprzężona z autorskim systemem akwizycji danych, który umożliwił zapis wyników pomiarów z czujników fotoelektrycznych oraz czujnika sterującego. Tak zarchiwizowane dane umożliwiły wyznaczenie zależności matematycznych w postaci formuł opisujących rozkład natężenia oświetlenia w pomieszczeniach w zależności od czasu i aktualnego natężenia światła dziennego mierzonego przez czujnik sterujący.

Wyznaczone formuły zostały wykorzystane przez autora do zaprogramowania elementu logiczno-sterującego w systemie KNX, który oblicza wartości natężenia oświetlenia w ustalonych punktach i na ich podstawie, po sprawdzeniu warunku  $E_r < 500$  lx, wysyła informacje do urządzenia załączającego lub wyłączającego odpowiednie obwody

oświetleniowe. Układ skonstruowany w ten sposób zapewnia uzyskanie wymaganej wartości natężenia oświetlenia w całym pomieszczeniu, przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia energii elektrycznej.

W celu wykazania oszczędności, autor przeprowadził analizę wpływu zaimplementowanego systemu sterowania oświetleniem na zmniejszenie zużycia energii w instalacjach sterujących oświetleniem. Ponadto autor przeprowadził analizę ekonomiczną implementacji systemu sterowania w kontekście czasu zwrotu wdrażanego systemu.

Przeprowadzone badania i analizy otrzymanych wyników pozwalają stwierdzić, że:

1. Uzyskanie równomiernego natężenia oświetlenia w pomieszczeniu z wykorzystaniem światła dziennego jest możliwe, gdy znany jest dokładny rozkład natężenia światła dziennego.
2. Zastosowanie odpowiednio dobranych algorytmów sterowania oświetleniem może wprowadzić oszczędności w zużyciu energii elektrycznej na poziomie 21–37%, w zależności od wariantu sterowania oświetleniem.
3. Możliwe jest zastosowanie jednego czujnika natężenia oświetlenia do sterowania oprawami oświetleniowymi w całym pomieszczeniu.

oraz umożliwiają sformułowanie następujących wniosków:

1. Rozkład natężenia oświetlenia w pomieszczeniach zależy jest od wielu czynników zewnętrznych, jak i wewnętrznych i należy go wyznaczać indywidualnie dla każdego pomieszczenia. Potwierdziły to badania wykonywane dla pomieszczeń położonych od strony południowej i północnej.
2. Wykorzystanie światła dziennego jest najefektywniejszym i najbardziej racjonalnym sposobem oszczędności zużycia energii na oświetlenie, zarówno z punktu widzenia ekonomicznego oraz komfortu użytkowania pomieszczeń.
3. Użytkownicy pomieszczeń bardzo często ograniczają dostęp światła dziennego do sal poprzez przysłonięcie lub zasłonięcie żaluzji, rolet itp., a następnie niedobór wymaganego natężenia oświetlenia regulują poprzez włączanie oświetlenia sztucznego, co w oczywisty sposób zmniejsza efektywność energetyczną obiektu. Zatem algorytmy sterowania instalacjami w obiektach należy opracowywać z uwzględnieniem zachowania użytkowników, w sposób ograniczający możliwość całkowitego wyłączenia automatyki sterującej.

Biorąc pod uwagę powyższe, można stwierdzić, że udowodniono tezę *„Efektywność energetyczną instalacji oświetleniowych można poprawić poprzez zastosowanie algorytmu sterowania wykorzystującego formuły matematyczne opisujące rozkłady natężenia oświetlenia wyznaczone przy użyciu matrycy fotometrycznej”*.

Przyszłe kierunki badań nad poprawą efektywności energetycznej budynków mogą dotyczyć ograniczania dostępu zbyt dużej ilości światła dziennego do pomieszczeń. Zbyt duża wartość natężenia światła dziennego wpływa na zwiększenie temperatury pomieszczeń, co wymusza konieczność stosowania układów klimatyzacji, które w znaczący sposób wpływają na zwiększenie zużycia energii elektrycznej. Ponadto nadmierna ilość światła obniża komfort użytkownika pomieszczeń, w szczególności w pomieszczeniach, w których wykorzystywane są monitory ekranowe, powszechnie dzisiaj wykorzystywane. Ograniczanie dostępu światła dziennego do pomieszczeń może zostać zrealizowane poprzez zastosowanie układów sterujących żaluzjami, roletami itp. Istnieje możliwość opracowania systemu przewidującego nadchodzące zmiany natężenia światła dziennego (śledzenie ruchu chmur podczas zachmurzenia) i załączanie oświetlenia sztucznego w sposób mniej zauważalny dla użytkownika pomieszczenia.

## 8. LITERATURA

- [1] A global and regional forecast to 2050, DNV AS. Design SDG, Minnesota, 2023.
- [2] A. Faron, „Aksjologia prawa administracyjnego. Czas jako wartość w funkcjonowaniu urzędu gminy”, *Rocznik Administracji Publicznej*, nr 8/2022, pp. 55-75, 2022.
- [3] Aghemo C., et al., „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.
- [4] Alla S., Bianco V., et al., „Retrofitting for improving energy efficiency: The embodied energy relevance for buildings' thermal insulation”, *International Conference on Energy Sustainability*, 2020.
- [5] Alsbary A., Szymański K., Michalak B., „Energy, Economic and Environmental Analysis of Alternative, High-Efficiency Sources of Heat and Energy for Multi-Family Residential Buildings in Order to Increase Energy Efficiency in Poland”, *Energies*, tom 16, p. 2673, 2023.
- [6] Amanowicz Ł., Ratajczak K., „Praktyczne aspekty projektowania energooszczędnych systemów wentylacyjnych”, *Rynek Instalacyjny*, nr 6, pp. 46-52, 2021.
- [7] Amanowicz Ł., Szczechowiak E., „Zasady projektowania systemów wentylacji budynków energooszczędnych”, *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, tom 48, nr 2, pp. 72-78, 2017.
- [8] Augustyn A., „Zrównoważony rozwój miast w świetle idei smart city”, Białystok: Wydawnictwo Uniwersytetu w Białymstoku, 2020.
- [9] Azwardi D., Andaiyani J., et al., „The Environmental Impacts of Natural Resources Depletion”, *Lecture Notes in Civil Engineering*, tom 334, pp. 705-714, 2023.
- [10] Babicz M., Nowakowicz-Dębek B., „Wybrane zagadnienia z zakresu ochrony środowiska”, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Lublin, 2021.
- [11] Baker N., Steemers K., „Daylight Design of Buildings, A Handbook for Architects and Engineers”, 2014.
- [12] Baños R. et al., „Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, tom 4, nr 11, pp. 1753-1766, 2011.
- [13] Barrett P., Zhang Y., et. al., „Clever classrooms: summary report of the HEAD project”, University of Salford, Salford, 2016.

- [14] Beloborodov S.S., Gasho E.G., „Evaluating the Influence of Wind and Solar Power Plants, Cogeneration, and Coal Share in the Fuel Balance on the Reduction of Greenhouse Gas Emissions”, *Thermal Engineering*, tom vol. 70, pp. 760-768, 2023.
- [15] Biuletyn Głównego Urzędu Miar, nr 1-2 (8-9), 2015.
- [16] Błaszczyński T., Signetzki J., „Nowoczesne zeroenergetyczne i zeroemisyjne obiekty budowlane na przykładzie Smart Building Center w Jasinie”, *Inżynieria i Budownictwo*, tom 76, nr 3, pp. 134-137, 2020.
- [17] Bochnia K., „Budynki niemal zeroenergetyczne”, *Builder Science*, tom 237, nr 4, pp. 64-65, 2017.
- [18] Bodart M., A De Herde, „Global energy savings in offices buildings by the use of daylighting”, *Energy and Buildings*, tom 34, pp. 421-429, 2002.
- [19] Borowska J., Kulczewska S., „Wpływ rodzaju paliwa na wartość wskaźnika energii pierwotnej w budynkach mieszkalnych jednorodzinnych”, *Technical Issues*, nr 4, pp. 3-8, 2016.
- [20] Bottero M., Cavana G., Dell’Anna F., „Feasibility analysis of the application of building automation and control system and their interaction with occupant behavior”, *Energy Efficiency*, tom 16, nr 83, 2023.
- [21] Brandi S., Gallo A., Capozzoli A., „A predictive and adaptive control strategy to optimize the management of integrated energy systems in buildings”, *Energy Reports*, tom 8, pp. 1550-1567, 2022.
- [22] Chengkang G., Sulong Z., et al., „Comprehensive comparison of multiple renewable power generation methods: A combination analysis of life cycle assessment and ecological footprint”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, tom 146, 2021.
- [23] Chew I., Karunatilaka D., Pin Tan C., Kalavally V., „Smart lighting: The way forward? Reviewing the past to shape the future”, *Energy and Buildings*, pp. 180-191, vol. 149, 2017.
- [24] Chwastek A., „Racjonalizacja zużycia energii w budynkach użyteczności publicznej”, *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*, nr 1, pp. 49-54, 2015.
- [25] Chwieduk B., „Wpływ wykorzystania instalacji fotowoltaicznej zasilającej pompę ciepła w okresie grzewczym na wskaźnik EK<sub>i</sub> EP charakterystyki energetycznej budynku”, *Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury*, t. 33, nr 4, pp. 53-60, 2016.
- [26] Chwieduk D., *Energetyka słoneczna budynku*, Warszawa: Arkady, 2011.
- [27] Chwieduk D., Chwieduk B., „Analysis of operation and energy performance of a heat pump driven by a PV system for space heating of a single family house in polish conditions”, *Renewable Energy*, vol. 165, nr 4, pp. 117-126, 2021.

- [28] Chwieduk D., Chwieduk M., „Wybrane aspekty tworzenia charakterystyki energetycznej budynku niskoenergetycznego”, *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*, tom XXXIII, nr 4, pp. 61-70, 2017.
- [29] Dadi Zhang, Philomena M. Bluysen, „Energy consumption, self-reported teachers' actions and children's perceived indoor environmental quality of nine primary school buildings in the Netherlands”, *Energy and Buildings*, tom 235, p. 17435, 2021.
- [30] Darula S., Kittler R., „Classification of Daylight Conditions in Cloud Cover Situations”, *Light & Engineering*, tom 23, nr 1, pp. 4-14, 2015.
- [31] David Fernández et al., „Productivity and energy efficiency assessment of existing industrial gases facilities via data envelopment analysis and the Malmquist index”, *Applied Energy*, tom 212, pp. 1563-1577, 2018.
- [32] Delgado L., Shealy T., „Opportunities for greater energy efficiency in government facilities by aligning decision structures with advances in behavioral science”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, tom 82, nr 3, pp. 3952-3961, 2018.
- [33] Delia D'Agostino, Livio Mazzarella, „What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions”, *Journal of Building Engineering*, tom 21, pp. 200-212, 2019.
- [34] Delvaeye R., Ryckaert W., et al., „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.
- [35] Drobyazko S., Drobyazko S., et al., „Modeling of prospects for the development of regional renewable energy”, *Energies*, tom 4, nr 2221, 2021.
- [36] Dylewski R., Adamczyk J., „Ocena wpływu lokalizacji budynku na zapotrzebowanie”, *Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji*, tom 3, pp. 60-73, 2014.
- [37] Dyrektywa 2006/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 5 kwietnia 2006 r. w sprawie efektywności końcowego wykorzystania energii i usług energetycznych.
- [38] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/27/UE z dnia 25 października w sprawie efektywności energetycznej. Bruksela 2012.
- [39] Dzik T., Dzik R., „Efektywność energetyczna i ekonomiczna funkcjonowania przedsiębiorstwa - doświadczenia z wdrożenia systemu zarządzania energią”, *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*, nr 4, pp. 403-412, 2017.
- [40] Energy Institute, „Statistical Review of World Energy”, 2023.
- [41] Geun Young Yun, et al., „Effects of occupancy and lighting use patterns on lighting energy consumption”, *Energy and Buildings*, tom 46, pp. 152-158, 2012.

- [42] Głuchy D., „Zastosowanie systemów SCADA do sterowania i wizualizacji pracy instalacji wykorzystujących OZE”, *Computer Applications in Electrical Engineering*, 2016.
- [43] Góra N., Suproniuk M., „Oszczędność energii płynąca ze stosowania systemów sterowania oświetleniem”, *Wiadomości Elektrotechniczne*, tom 90, nr 4, pp. 7-12, 2022.
- [44] Gureeva I., Davydov V. Rud V., „Development of optical systems for additional lighting of premises with sunlight”, *7th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology*, Samara, 2021.
- [45] Hajduk Aleksandra Ewa, „Planowanie zamówień jako narzędzie do efektywnego wydatkowania środków publicznych”, *Przegląd Prawno-Ekonomiczny*, pp. 99-113, 2021.
- [46] Han Y., Taylor J.E., et al., „Exploring mutual shading and mutual reflection inter-building effects on building energy performance”, *Applied Energy*, tom 185, pp. 1556-1564, 2017.
- [47] Hernánde, F., et al., „Impact of zoning heating and air conditioning control systems in users comfort and energy efficiency in residential buildings”, *Energy Conversion and Management*, tom 267, p. 115954, 2022.
- [48] I. E. Agency, „World Energy Outlook 2022 Reports”, Paris, 2022.
- [49] IEA 2019 Global Energy & CO2 Status Report 2019, „International Energy Agency”, Paris, 2020.
- [50] Ihara T. Gustavsen A., „Effect of facade components on energy efficiency in office buildings”, *Effect of facade components on energy efficiency in office buildings*, tom 158, pp. 422-432, 2015.
- [51] Iringová A., „Design of a residential building in confined urban spaces in terms of daylighting optimization and insolation of flats – A case study”, *International Review of Applied Sciences and Engineering*, tom 9, pp. 95-100, 2018.
- [52] Iris C., Siu Lee Lam J., „A review of energy efficiency in ports: Operational strategies, technologies and energy management systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nr 112, pp. 170-182, 2019.
- [53] Janosik E., „Pozytywne i negatywne aspekty oddziaływania światła na człowieka”, *Zanieczyszczenie światłem*, nr 4, pp. 617-623, 2017.
- [54] Jelena T., et al., „Influence of Ventilation Operating Modes on Energy Efficiency”, *Buildings*, tom 5, p. Buildings, 2022.
- [55] Jianxiu W., et al., „Study of surrounding buildings’ shading effect on solar radiation through windows in different climates”, *Sustainable Cities and Society*, t. 86, p. 104143, 2022.



- [56] Jovanović A., et al., „Importance of building orientation in determining daylighting quality in student dorm rooms: Physical and simulated daylighting parameters’ values compared to subjective survey results”, *Energy and Buildings*, tom 77, pp. 158-170, 2014.
- [57] Kastalerska M., „Znaczenie efektywności energetycznej”, *Polityka energetyczna*, tom 14, nr 1, 2011.
- [58] Kasztelan A., Nowak A. et. at., „Konkurencyjna biogospodarka szansą dla zrównoważonego rozwoju krajów Unii Europejskiej”, 2021.
- [59] Katafygiotou M. C., Serghides D.K., „Analysis of structural elements and energy consumption of school building stock in Cyprus: Energy simulations and upgrade scenarios of a typical school”, *Energy and Buildings*, tom 72, pp. 8-16, 2014.
- [60] Kodeks pracy, Dz. U. 2023 poz. 1465, Art, 207 § 2. Warszawa 2023.
- [61] Kolegov Yu.Ye., „An increase in the efficiency of heat supply systems on reconstruction of energy sources and modernization of gas supply systems”, *Thermal Engineering*, tom 59, pp. 316 - 320, 2012.
- [62] Kowalke K., Prochownik M., „Wpływ pakietu energetyczno-klimatycznego na proces unowocześniania polskiego sektora energetycznego”, tom 12, nr 4, 2014.
- [63] Krajowy Ośrodek Bilansowania, „Raport z rynku CO2”, Warszawa, 2023.
- [64] Kubicki J, Kopczyński K., Młyńczak J., „Wpływ wzrostu stężenia CO2 w atmosferze”, *Biuletyn WAT*, tom 69, nr 3, pp. 15-33, 2020.
- [65] Kunwar N., Bhandari M., „A comprehensive analysis of energy and daylighting impact of window shading systems and control strategies on commercial buildings in the United States”, *Energies*, tom 13, p. 2401, 2020.
- [66] Kwiatkowski J., „Wpływ systemu zasilania w energię wielorodzinnego budynku mieszkalnego na wartość wskaźnika EP”, *Rynek Instalacyjny*, nr 3, pp. 84-88, 2021.
- [67] Liu J., et al., „The impact of exterior surface convective heat transfer coefficients on the building energy consumption in urban neighborhoods with different plan area densities”, *Energy and Buildings*, tom 86, pp. 449-463, 2015.
- [68] Maesano C., Annesi-Maesano I., „Impact of Lighting on School Performance in European Classrooms”, *Sorbonne Universités, Paris*, 2016.
- [69] Mania T., „Budynki blisko zeroenergetyczne - zastosowanie pomp ciepła i instalacji fotowoltaicznych”, *Inżynier Budownictwa*, nr 2, pp. 43-44, 46-48, 2021.
- [70] Mariusz Kudelko, „Wycena kosztów zewnętrznych w energetyce – studium przypadku”, tom 16, nr 4/2/2018, pp. 118-127, 2018.

- [71] Markiewicz P., Barnaś K., „Wpływ orientacji budynku względem stron świata, wielkości przeszkleń oraz konstrukcji okien i sposobu ich montażu na zużycie energii końcowej na ogrzewanie w budynkach energooszczędnych”, *Środowisko Mieszkaniowe*, pp. 23-33, 2016.
- [72] Marzec E., „Zintegrowany z budynkiem system trójgeneracyjny – ocena efektywności energetycznej z uwzględnieniem pełnego cyklu życia”, *Archiwum Instytutu Techniki Ciepłej*, tom 5, pp. 91-116, 2018.
- [73] Mashaly, Islam Ayman, et al., „The effect of vegetation on daylight availability”, *Building Simulation Applications*, pp. 163-170, 2015.
- [74] Matuszko Dorota, „Wpływ zachmurzenia na usłonecznienie i całkowite promieniowanie słoneczne”, *Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego*, Kraków, 2009.
- [75] Meester T., et al., „Impacts of occupant behaviours on residential heating consumption for detached houses in a temperate climate in the northern part of Europe”, *Energy and Buildings*, tom 57, pp. 313-323, 2013.
- [76] Michał Golarz, „Bezpieczeństwo energetyczne Polski na przykładzie zaopatrzenia w gaz ziemny, ropę naftową i energię elektryczną”, *Oficyna Wydawnicza KA AFM*, 2016.
- [77] Michalowski M., Dudzicz K., Tora B., „CO2 emissions with the option of reduce on the example of the EDF Poland S.A.”, *Inżynieria Mineralna*, tom 15, nr 1, pp. 269-274, 214.
- [78] Min Z., Morgenstern P., et al., „Facilities management added value in closing the energy performance gap”, *International Journal of Sustainable Built Environment*, tom 2, nr 5, pp. 197-209, 2016.
- [79] Mirowski T., „Wybrane problemy związane z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii w Polsce”, *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN*, nr 98, pp. 5-14, 2017.
- [80] Misiągiewicz J., *Bezpieczeństwo energetyczne Unii Europejskiej*, Lublin: Wydawnictwo Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej, 2019.
- [81] Mudryk K., Werle S., **Sowa S.**, „Increasing the Energy Efficiency of Hybrid RES Installations Using KNX System”, w *Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation*, Springer, 2018, pp. 633-641.
- [82] Mumine Gercek, Zeynep Durmuş A., „Energy and environmental performance based decision support process for early design stages of residential buildings under climate change”, *Sustainable Cities and Society*, tom 48, nr 101580, 2019.
- [83] Niewitecka K., „Możliwości odzysku ciepła ze ścieków szarych na cele wstępnego podgrzewania wody”, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, tom 92, nr 5, pp. 194-198, 2018.

- [84] Norma PN-EN 12665:2018-08, "Światło i oświetlenie -- Podstawowe terminy oraz kryteria określania wymagań dotyczących oświetlenia". Warszawa, 2018.
- [85] Nowak K., „Modernizacja budynków a komfort cieplny pomieszczeń”, *Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce*, tom 6, nr 2, pp. 77-82, 2011.
- [86] Nowak-Dzieszko K., Rojewska-Warchał M., „Analiza wpływu termomodernizacji na straty ciepła przez przenikanie i komfort cieplny budynku”, *Przegląd Budowlany*, tom 86, nr 6, pp. 70-74, 2015.
- [87] Nowiński Emil, „Transformacja energetyki a bezpieczeństwo energetyczne Polski”, *Nowa Energia*, nr 3, pp. 42-47, 2021.
- [88] Obwieszczenie Ministra Rozwoju i Technologii, *Dziennik Ustaw RP* z dn. 15.04.2022r., poz.1225, Warszawa, 2022.
- [89] Obwieszczenie MRiT w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie z dn. 9.06.2022r. Poz 1225, Warszawa.
- [90] Papinutto M., et al., „Saving energy by maximising daylight and minimising the impact on occupants: An automatic lighting system approach”, *Energy and Buildings*, tom 268, p. 112176, 2022.
- [91] Pawlicki B., „Innowacyjna metoda FBVR do zarządzania zapotrzebowaniem na moc i energię elektryczną”, *Wiadomości Elektrotechniczne*, 2016.
- [92] Pawłowski K., Nakielska M., „Wybrane aspekty projektowe przegród i złączy budowlanych budynków o niskim zużyciu energii”, *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*, tom 7, nr 2, pp. 131-140, 2018.
- [93] Petri I., et al., „A modular optimisation model for reducing energy consumption in large scale building facilities”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nr 38, pp. 990-1002, 2014.
- [94] Piebiak I., „Zasady doboru współczynnika całkowitej przepuszczalności energii promieniowania słonecznego przeszkleń w energooszczędnych budynkach jednorodzinnych”, *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*, tom 64, nr 1, pp. 181-188, 2017.
- [95] Piotrowska E., „Modelowanie natężenia oświetlenia dziennego w programie Dialux”, *Electrical Engineering*, nr 88, pp. 325-335, 2016.
- [96] PN-B-02380:1971 - wersja polska. "Oświetlenie wnętrz światłem dziennym–Warunki ogólne", Warszawa 1971.
- [97] PN-EN 12464-1:2022-01, Światło i oświetlenie - Oświetlenie miejsc pracy - Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach, 2022.

- [98] PN-EN 13321-1:2021-08 Automatyka, sterowanie i zarządzanie budynkami – systemy elektroniczne domu i budynku – Część 1: Wymagania dotyczące produktu i systemu, Warszawa, 2021.
- [99] Podręcznik użytkownika Polskiego Zasobu Normalizacyjnego, pp. 1-192, 2018.
- [100] Polska Norma PN-EN:2012 „Światło i oświetlenie”, PKN, Warszawa, XII 2012r.
- [101] Rasoulinezhad Ehsan et al., “Determinants of energy transition in Asia”, Springer Nature, pp. 511-543, 2023.
- [102] Reinhart C.F., „A simulation-based review of the ubiquitous window-head-height to daylit zone depth rule-of-thumb”, Building Simulation, 2005.
- [103] Reiter S., De Herde A., Natural Lighting of Buildings (in French), Presses Universitaires de Louvain, 2004.
- [104] Ritchie H., Rosado P., Roser M., „Energy Production and Consumption”, Global Change Data Lab, Londyn, 2023.
- [105] Robinson A., Selkowitz S., „Tips for Daylighting with Windows”, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013.
- [106] Rozporządzenie Ministra Energii w sprawie szczegółowego zakresu i sposobu sporządzania audytu efektywności energetycznej, Dziennik Ustaw RP poz. 1220 z dn. 28.06.2023r., Warszawa.
- [107] Różycki K., „Efekty energetyczne wybranych wariantów termomodernizacji budynków mieszkalnych”, Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury, tom 64, nr 4/I, pp. 145-152, 2017.
- [108] Różycki K., „Termomodernizacja przykładowego budynku użyteczności publicznej w polskich warunkach klimatycznych”, Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym, nr 1, pp. 81-88, 2017.
- [109] Rzeszowska N., „Termomodernizacja budynku szkoły publicznej w celu obniżenia zapotrzebowania na energię pierwotną obiektu”, Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym, tom 7, nr 1, pp. 95-102, 2018.
- [110] Sermin Onaygil, Önder Güler, „Determination of the energy saving by daylight”, Building and Environment, tom 38, p. 973-977, 2003.
- [111] Shkarovskiy A., Gawin R., „Poprawa efektywności energetycznej budynków użyteczności publicznej”, Polityka Energetyczna, tom 19, pp. 87-98, 2016.
- [112] Sikorska A., „Wpływ wzrostu stężenia CO<sub>2</sub> w atmosferze na proces absorpcji promieniowania termicznego”, Tutoring Gedanensis, nr 8(2)/2023, pp. 28-43, 2023.

- [113] Simá E., et al., „Tree and neighboring buildings shading effects on the thermal”, *Build Simul*, nr 8, p. 711-723, 2015.
- [114] Sowa J., „Modernizacja budynków użyteczności publicznej do standardu niemal zeroenergetycznego – przykłady obiektów norweskich”, *Rynek Instalacyjny*, nr 7-8, pp. 22-27, Grupa MEDIUM Sp. z o.o. Sp.k.a., 2017.
- [115] **Sowa S.**, „An improvement in the energetic efficiency of a building using daylight in the light control system”, *E3S Web of Conferences*, tom 45, p. 00115, 2018.
- [116] **Sowa S.**, „The capacity market and its impact on the development of distributed energy sources”, *Polityka Energetyczna*, tom 22, pp. 65-80, 2019.
- [117] **Sowa S.**, „Efficiency of the RES Hybrid Microinstallations Working in Energy Clusters”, *MATEC Web of Conferences*, p. 03016, 2018.
- [118] **Sowa S.**, „Improving the energy efficiency of lighting systems by the use of solar radiation”, *E3S Web of Conferences*, tom 70, p. 01013, 2018.
- [119] **Sowa S.**, „Increase in the Energy Efficiency of Facilities by Using RES Systems as a Criterion for Environmental Quality Improvement”, *Journal of Ecological Engineering*, tom 21, pp. 204-209, 2020.
- [120] **Sowa S.**, „Lighting control systems using daylight to optimise energy efficiency of the building”, *Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE)*, pp.1-4, 2019.
- [121] **Sowa S.**, „Lighting control system using solar energy to provide 24-hour lighting of the facility”. 12th International Conference and Exhibition on Electrical Power Quality and Utilisation-(EPQU). IEEE,2020.
- [122] **Sowa S.**, „Natężenie światła dziennego w budynku szkoły”, *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, nr 3, pp. 78-81, 2017.
- [123] **Sowa S.**, „Odnawialne źródła energii jako czynnik wpływający na poprawę efektywności energetycznej”, *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN*, nr 105, pp. 187-196, 2018.
- [124] **Sowa S.**, „Renewable sources of energy as a factor influencing improvement in energy efficiency”, *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi Polskiej Akademii Nauk*, tom 21, nr 7, p. 187-196, 2018.
- [125] **Sowa S.**, „Sposoby poprawy efektywności energetycznej instalacji oświetleniowych w budynkach użyteczności publicznej”, *Electrical Engineering*, tom 98, pp. 137-147, 2019.
- [126] **Sowa S.**, „The implementation of renewable energy systems, as a way to improve energy efficiency in residential buildings”, *Polityka Energetyczna*, tom 23, pp. 19-36, 2020.

- [127] **Sowa S.**, „Up-to-date solutions for reducing electricity consumption in lighting installations”, ITM Web of Conferences, tom 28, p. 01043, 2019.
- [128] **Sowa S.**, Gielniak J., „Lighting control algorithms in a school venue using KNX system”, Electrical Engineering, tom 96, pp. 153-162, 2018.
- [129] **Sowa S.**, Gielniak J., „Photoresistor matrix utilisation in indoor light intensity distribution investigation”, Przegląd Elektrotechniczny, tom 94, nr 10, pp. 203-206, 2018.
- [130] **Sowa S.**, Kamińska A., „Prognozowane zmniejszenie zużycia energii w budynku szkoły przez sterowanie oświetleniem w systemie KNX”, Przegląd Elektrotechniczny, pp. 193-197, 2018.
- [131] Śpiewak R., Wesołowska P., „Mikroekonomiczne ujęcie analizy ryzyka inwestowania w alternatywne źródła wytwarzania energii elektrycznej”, Zeszyty Studenckie Wydziału Ekonomicznego, pp. 174-189, 2017.
- [132] Stachniewicz R., Święcicki A., „Praktyczna weryfikacja założeń projektowych budynku wzniesionego w standardzie niskoenergetycznym”, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, tom 50, nr 1, pp. 3-8, 2019.
- [133] Suproniuk M., Paś F., „Analiza energii elektrycznej pobieranej w obiektach użyteczności publicznej”, Przegląd Elektrotechniczny, tom 95, nr 11, pp. 99-102, 2019.
- [134] SYun G., Chun Yoon K., Soo, Kim K., „The influence of shading control strategies on”, vol. 84, 2014.
- [135] Szczechowiak E. et al., „Niemal zeroenergetyczny budynek użyteczności publicznej - case study budynku Wydziału Architektury i Wydziału Inżynierii Zarządzania Politechniki Poznańskiej”. Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, tom 53, nr 12, pp. 13-19, 2022.
- [136] Szczotka K., Szymiczek J., Michalak P., „Analiza wpływu zastosowania odnawialnych źródeł energii na charakterystykę energetyczną budynku jednorodzinnego”, Rynek Energii, nr 5, pp. 21-30, 2022.
- [137] Tatiana de Meester et al., „Impacts of occupant behaviours on residential heating consumption for detached houses in a temperate climate in the northern part of Europe”, Energy and Buildings, tom 57, pp. 313-323, 2013.
- [138] Tientcheu S., Simplicie I., Chowdhury S., „Intelligent energy management strategy for automated office buildings”, Energies, tom 12, 2019.
- [139] Turlej Z., „Elementy prozdrowotne w oświetleniu”, Prace Instytutu Elektrotechniki, tom 232, pp. 53-73, 2007.
- [140] Union, Council of the European, „Fit for 55”, 2022.

- [141] Ustawa o efektywności energetycznej, art. 2, pkt. 3, Dziennik Ustaw RP z dn. 20.05.2016r., Warszawa.
- [142] Ustawa o szczególnych rozwiązaniach służących ochronie odbiorców energii elektrycznej w 2023 roku w związku z sytuacją na rynku energii elektrycznej, Dz.U. poz. 2127 z dn. 7.10.2022r., Warszawa.
- [143] Valladares-Rendón L. G., et al., „Review on energy savings by solar control techniques and optimal building orientation for the strategic placement of façade shading systems”, *Energy and Buildings*, tom 140, pp. 458-479, 2017.
- [144] Van Dijk, Dick, „EN ISO 52016-1: The new international standard to calculate building energy needs for heating and cooling, internal temperatures and heating and cooling load”, *Building Simulation Conference Proceedings*, tom 6, pp. 4061 - 4068, 2019.
- [145] Wąs K., Radoń J., Sadłowska-Sałęga A., „Thermal Comfort-Case Study in a Lightweight Passive House”, *Energies*, tom 13, p. 4687, 2022.
- [146] Wasiuta A., „Identyfikacja i oszacowanie barier rozwoju”, *Wybrane problemy administracji publicznej*, pp. 153-169, 2015.
- [147] Wasti D., Aspota T., et al., „Climate change and the hydropower sector: A global review”, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, tom 2, nr 13, 2022.
- [148] Wesołowski Ł., „Wpływ przeszklonych ścian osłonowych na komfort środowiska w pomieszczeniach mieszkalnych - wybrane aspekty”, *Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury*, tom XXXII, nr 3/I/15, pp. 497-510, 2015.
- [149] Wiśniewska M., Pusz A., Rogalski D., „Rozwój odnawialnych źródeł energii (OZE) w Unii Europejskiej i w Polsce”, *Polish Journal of Sustainable Development*, tom 24, nr 2, pp. 101-112, 2021.
- [150] Wiśniewski G., „Energia dla przyszłości: odnawialne źródła energii - Biała Księga Komisji Europejskiej”, *Technika Poszukiwań Geologicznych*, tom 37, nr 4, pp. 53-59, 1998.
- [151] *World Energy Outlook 2022*, Agency International Energy, Paris, 2022.
- [152] Życzyńska A., Dyś G., „Wpływ zysków ciepła od promieniowania słonecznego na wartość wskaźnika nieodnawialnej energii pierwotnej budynku”, *Fizyka budowli w teorii i praktyce*, tom VIII, nr 1, pp. 45-52, 2016.
- [153] Żagan W., „Podstawy techniki świetlnej”, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005.