

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



**AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

*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

## SPIS TREŚCI

|   |    |
|---|----|
| 1. Wstęp i uzasadnienie wyboru tematu rozprawy.....                     | 3  |
| 2. Cel, teza i zakres rozprawy.....                                     | 4  |
| 3. Bezprzewodowa matryca fotometryczna.....                             | 5  |
| 4. Badania rozkładu natężenia oświetlenia w pomieszczeniach.....        | 8  |
| 5. Implementacja wyników badań do opracowanego systemu sterowania....   | 10 |
| 6. Oszczędności w zużyciu energii elektrycznej.....                     | 17 |
| 7. Analiza ekonomiczna zastosowanego systemu sterowania oświetleniem... | 21 |
| 8. Podsumowanie i wnioski końcowe.....                                  | 24 |
| 9. Dorobek naukowy autora.....  | 27 |

## 1. WSTĘP I UZASADNIENIE WYBORU TEMATU ROZPRAWY

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. Rozwój technologii oraz wzrost konsumpcji powodują zwiększone zapotrzebowanie na energię elektryczną, zarówno w przemyśle jak i sektorach publicznych i prywatnych. Głównym surowcem wykorzystywanym do produkcji energii elektrycznej na świecie są paliwa kopalne. Stanowią one dzisiaj 81% łącznego udziału w wytwarzaniu energii elektrycznej. Tak znaczący udział paliw kopalnych w procesie wytwarzania energii elektrycznej ma negatywne skutki dla środowiska w postaci jego degradacji oraz zanieczyszczenia. Dostające się do atmosfery zanieczyszczenia takie jak, np. CO<sub>2</sub> są główną przyczyną zmian klimatycznych na Ziemi. 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. 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. Mając na uwadze wzrastające zapotrzebowanie na rozwiązania proekologiczne, służące ograniczeniu zużycia energii, autor postanowił opracować system sterowania oświetleniem, który wykorzystując światło naturalne, ogranicza zużycie energii w instalacjach oświetleniowych. Do realizacji założonego celu konieczne było przeprowadzenie badań rozkładu światła dziennego w pomieszczeniach.

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 opracowania formuł matematycznych opisujących rozkłady natężenia światła oraz opracowania algorytmu sterowania oświetleniem w sposób umożliwiający uzyskanie równomiernego rozkładu natężenia oświetlenia na całej powierzchni pomieszczenia. Pozwoliło to na zmniejszanie zużycia energii elektrycznej przez poszczególne oprawy oświetleniowe zainstalowane w badanych pomieszczeniach. W pracy oszacowano wielkość uzyskanej oszczędności dla całego obiektu, w którym przeprowadzono badania 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. CEL, TEZA I ZAKRES 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 algorytmów sterowania wykorzystujących 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;

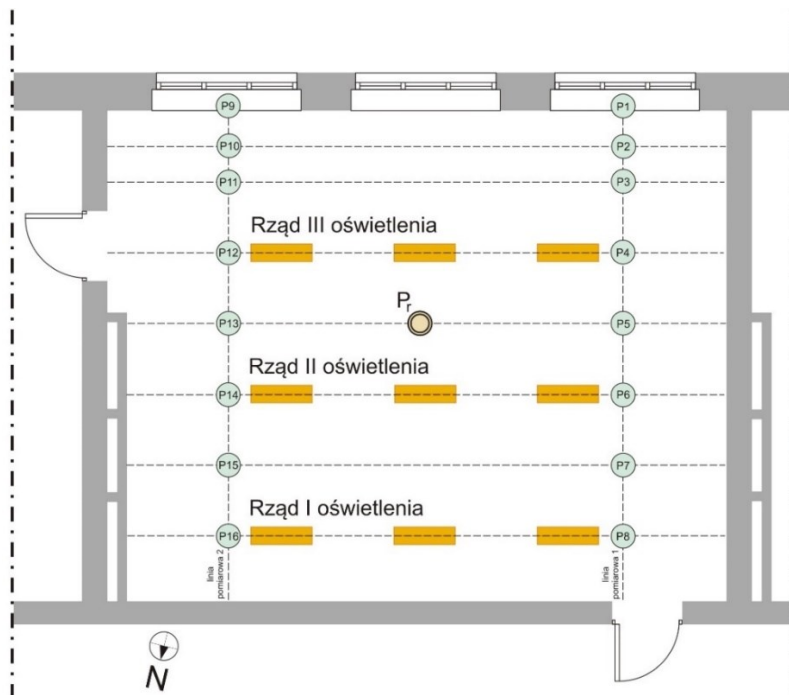
- opracowanie projektu i wykonanie układu matrycowego pomiaru natężenia oświetlenia w pomieszczeniach (matryca fotometryczna) oraz przeprowadzenie pomiarów natężenia światła dziennego w pomieszczeniach dydaktycznych, na podstawie których opracowano matematyczne zależności opisujące rozkłady natężenia 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.

**Zakres pracy** obejmuje sześć rozdziałów zasadniczych, podsumowanie oraz spis literatury. W rozdziale drugim opisano zagadnienia oświetlenia w aspekcie efektywności energetycznej. Rozdział czwarty przedstawia koncepcję układu sterowania oświetleniem. Rozdział piąty poświęcony jest badaniom rozkładu natężenia oświetlenia w pomieszczeniach. Opisana jest w nim zastosowana metoda badawcza, opis miejsca, w którym wykonywano badania oraz przedstawiona jest budowa pomiarowej matrycy fotometrycznej (hardware i software). Rozdział szósty jest poświęcony implementacji wyników badań do opracowanego układu sterowania oświetleniem. Zawiera opracowane formuły matematyczne, które opisują rozkłady natężenia oświetlenia i służą do sterowania oświetleniem sztucznym w systemie KNX. Opisana jest także weryfikacja poprawności działania układu sterowania. W końcowej części rozdziału opisane są oszczędności wynikające z zastosowania opracowanego układu sterowania oraz przeprowadzona jest analiza ekonomiczna czasu zwrotu inwestycji, w postaci zmodernizowania instalacji oświetleniowej.

Rozdział siódmy stanowi podsumowanie rozprawy, gdzie sprecyzowano wnioski oraz wskazano dalsze kierunki badań w ramach przedstawianego zagadnienia.

### **3. BEZPRZEWODOWA MATRYCA FOTOMETRYCZNA**

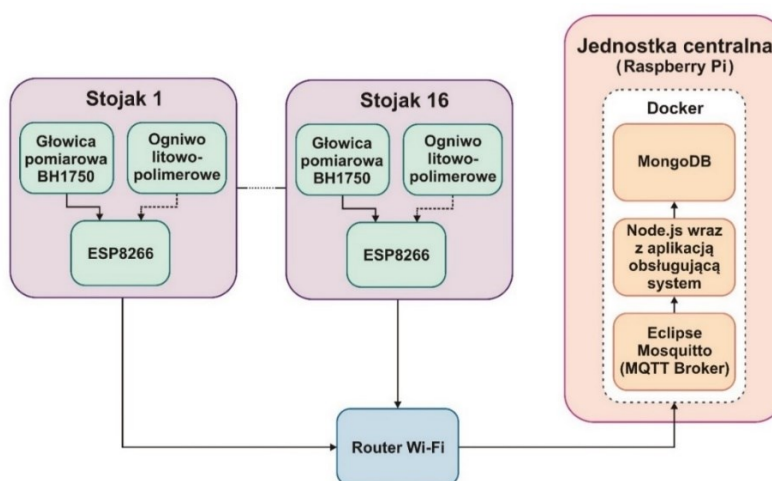
Koncepcja budowy matrycowego urządzenia pomiarowego powstała z konieczności uzyskania wartości natężenia oświetlenia w kilkunastu punktach pomieszczenia jednocześnie, co miało na celu przede wszystkim wyeliminowanie błędów pomiarowych, występujących przy ręcznym pomiarze natężenia oświetlenia z użyciem luksomierza. 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. Rozmieszczenie punktów pomiarowych natężenia oświetlenia w pomieszczeniu od strony południowej (S) przedstawiono na rysunku 3.1.



Rys. 3.1. Punkty pomiarowe natężenia oświetlenia w pomieszczeniu od strony S, w którym dokonywano pomiarów

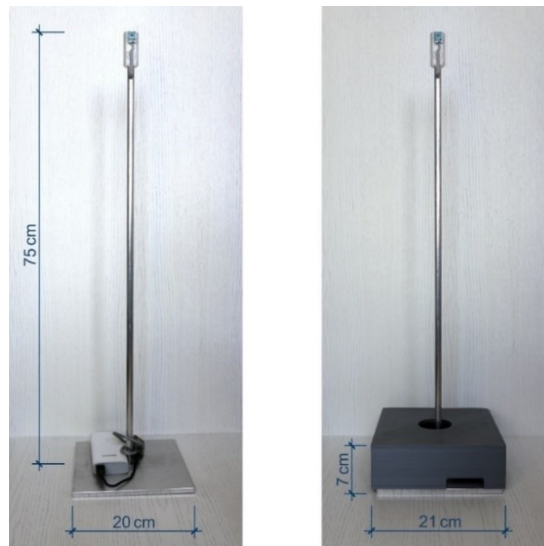
Źródło: [opracowanie własne]

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 (*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. Schemat działania matrycy pomiarowej natężenia oświetlenia przedstawiono na rysunku 3.2. Stojaki pomiarowe użyte podczas badań wraz z parametrami szczegółowymi przedstawiono na rysunku 3.3.



Rys. 3.2. Schemat działania matrycy pomiarowej natężenia oświetlenia

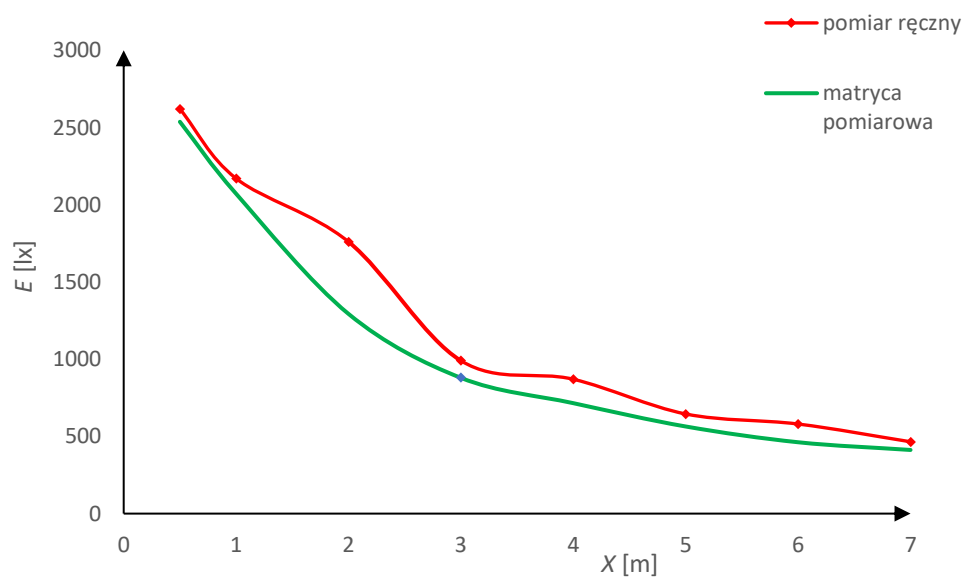
Źródło: [opracowanie własne]



Rys. 3.3. Stojak pomiarowy bezprzewodowej matrycy fotometrycznej

Źródło: [opracowanie własne]

W pracy wykazano rozbieżności wynikające z pomiaru ręcznego oraz z użyciem matrycy fotometrycznej. 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. Przykładowe wykresy dla pomiaru ręcznego i wykonanego z użyciem matrycy fotometrycznej w pomieszczeniu od strony północnej (N), przedstawiono na rysunku 3.4.



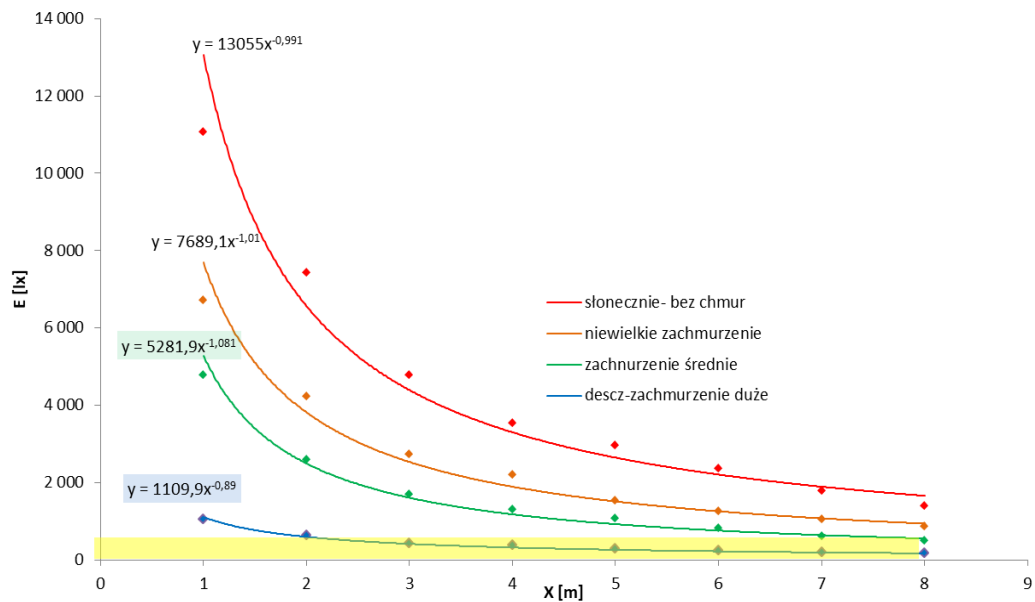
Rys. 3.4. Charakterystyki rozkładu natężenia oświetlenia w pomieszczeniu od strony północnej (N), 21 lipca. Pomiar wykonany ręcznie i za pomocą matrycy

#### **4. BADANIA ROZKŁADU NATĘŻENIA OŚWIETLENIA W POMIESZCZENIACH**

Przeprowadzone pomiary zostały wykonane w celu uzyskania wyników natężenia oświetlenia w pomieszczeniu. Otrzymane dane pozwoliły na wyznaczenie rozkładów natężenia oświetlenia, co umożliwiło opracowanie algorytmów sterowania oświetleniem. Oświetlenie sztuczne jest wymagane, gdy w najdalszym punkcie od okna nie ma wymaganej wartości natężenia oświetlenia. W takich przypadkach w zależności od niedoboru natężenia oświetlenia w pomieszczeniu jest wymagane uruchomienie odpowiednich rzędów opraw oświetleniowych. Jeśli natężenie światła dziennego w najdalszym punkcie od okna ma wymaganą wartość, to załączenie oświetlenia sztucznego nie jest wymagane. Zatem pomiary natężenia oświetlenia zostały wykonane głównie w przypadkach, kiedy natężenie oświetlenia w najdalej położonym od okna miejscu, czyli punkcie pomiarowym P8 lub P16 (rys. 3.1) 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 (tab. 5.1).

Uzyskane wyniki pomiarów natężenia oświetlenia w pomieszczeniu I, położonym od strony południowej, dla różnych warunków pogodowych, przedstawiono na rysunku 4.1. Pomiarów dokonano przy zmieniającym się zachmurzeniu, co pozwoliło na przedstawienie, w jaki sposób warunki pogodowe wpływają na rozkład natężenia oświetlenia w pomieszczeniu.

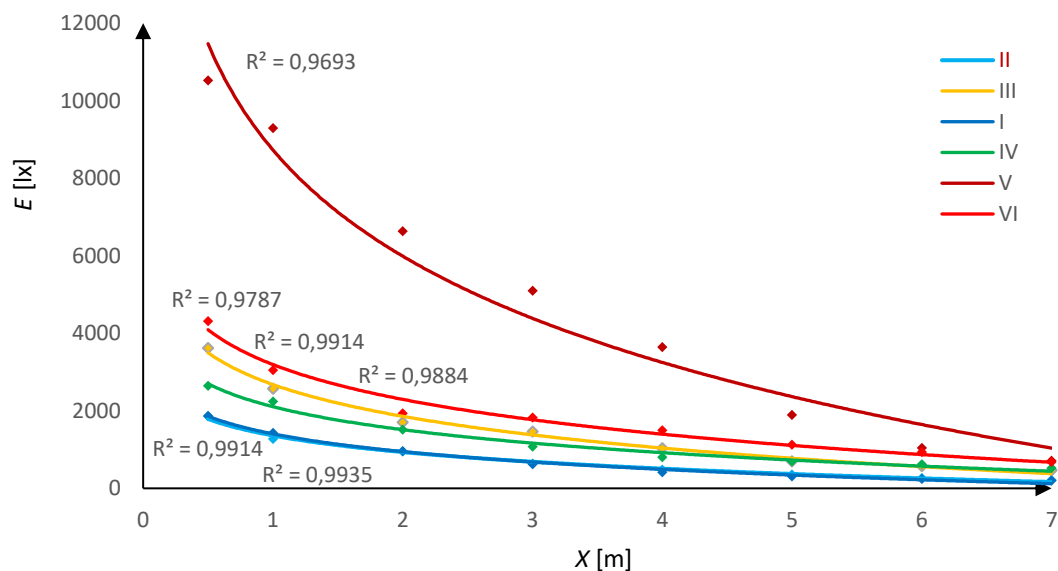




Rys. 4.1. Rozkład natężenia oświetlenia w funkcji głębokości pomieszczenia I (od strony Południowej (S) dla różnych warunków atmosferycznych w miesiącu marcu)

Źródło: [opracowanie własne]

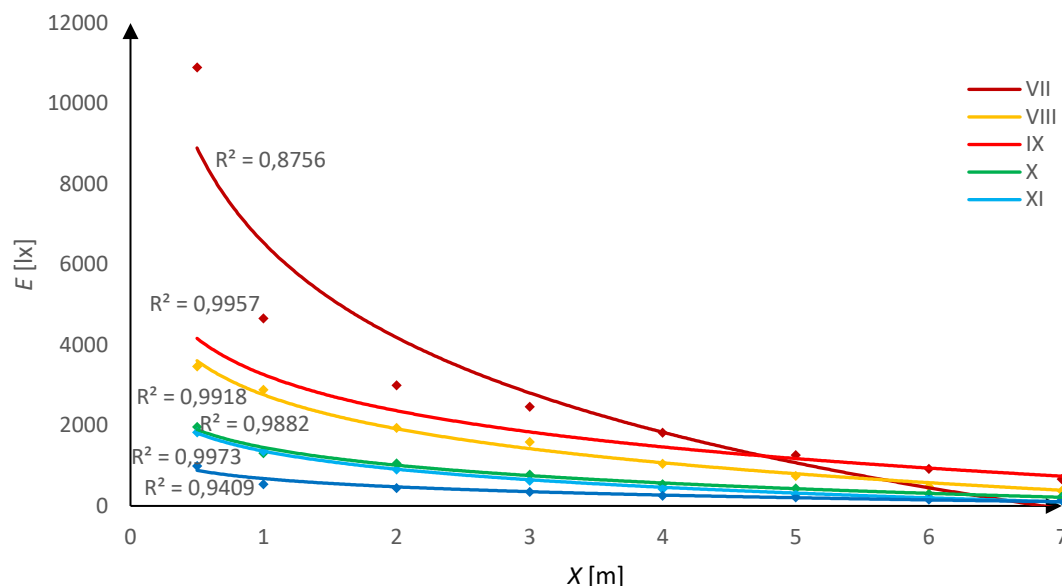
Rysunek 4.2 przedstawia rozkłady natężenia oświetlenia w pomieszczeniu od strony południowej S dla poszczególnych miesięcy pierwszego półrocza.



Rys. 4.2. Średni rozkład natężenia światła dziennego w sali od strony południowej (S) dla poszczególnych miesięcy, od stycznia (I) do czerwca (VI)

Źródło: [opracowanie własne]

Natomiast na rysunku 4.3 przedstawiono rozkłady natężenia światła dziennego w sali od strony południowej (S) dla pozostałych sześciu miesięcy w roku. Na podstawie danych o rozkładach natężenia w pomieszczeniu opracowano formuły matematyczne opisujące rozkłady natężenia oświetlenia, które następnie zostały użyte do sterowania oświetleniem sztucznym.



Rys. 4.3. Rozkład natężenia światła dziennego w sali od strony południowej (S) dla poszczególnych miesięcy, od lipca (VII) do grudnia (XII)

Źródło: [opracowanie własne]

## 5. IMPLEMENTACJA WYNIKÓW BADAŃ DO OPRACOWANEGO UKŁADU STEROWANIA OŚWIETLENIEM

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:

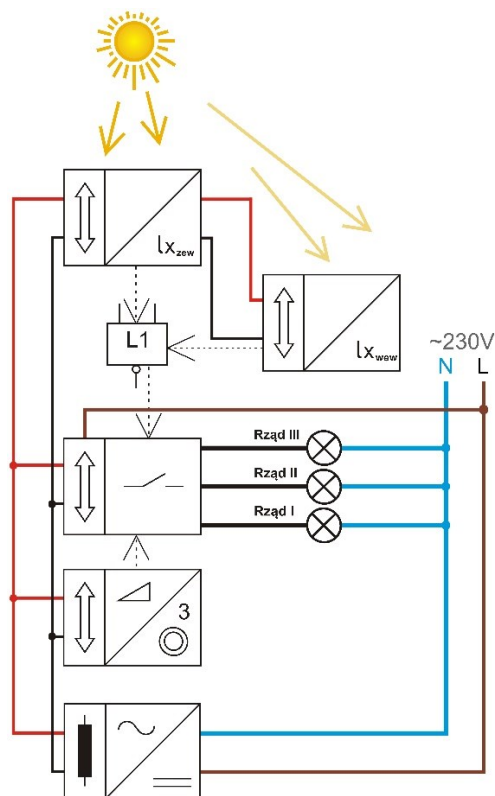
- spełniać wymagania zawarte w normie oświetleniowej PN - EN 12464-1:2022-01;

- 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.

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. Umieszczenie montażu przedstawia rysunek 3.1. 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 z wykorzystaniem standardu KNX został przedstawiony na rysunku 5.1.

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.

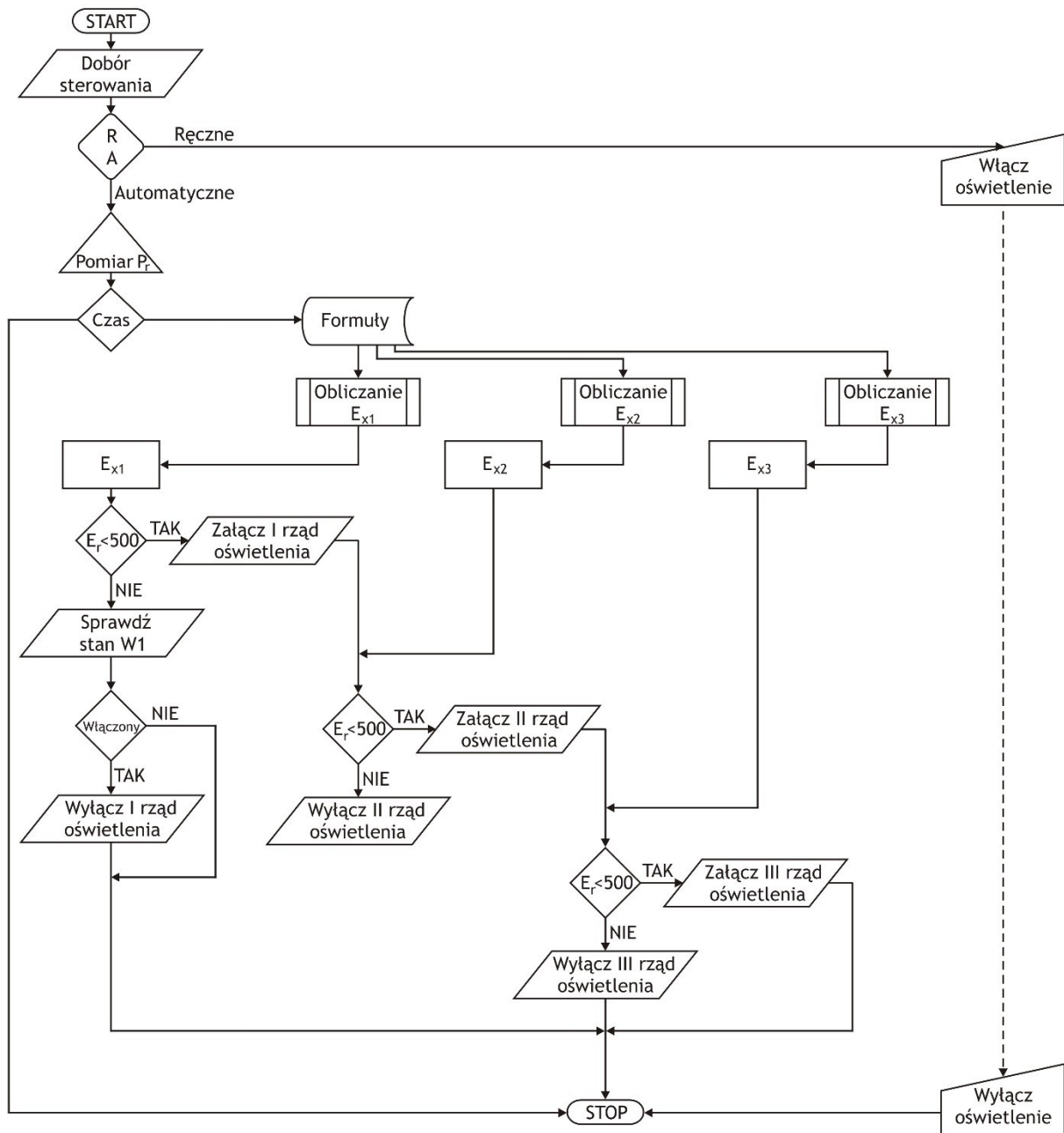


Rys. 5.1. Poglądowy schemat systemu sterowania oświetleniem w standardzie KNX

*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 5.2. 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.



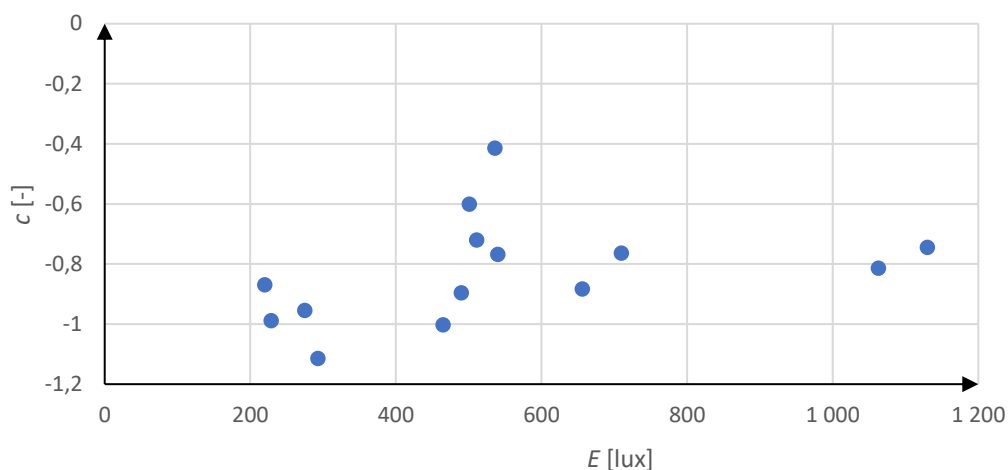
Rys. 5.2. Algorytm opracowanego systemu sterowania oświetleniem w pomieszczeniu

Źródło: [opracowanie własne]

W celu implementacji systemu sterowania oświetleniem konieczne jest uzyskanie jednej lub najwyżej kilku formuł, które na podstawie pomiaru z jednego punktu umożliwią sterowanie oświetleniem w całym pomieszczeniu. Wyznaczono 6 okresów pomiarowych uzależnionych od ruchu Słońca na niebie, zatem postanowiono wyznaczyć też 6 formuł opisujących rozkład natężenia oświetlenia, osobno dla każdego okresu (tabela 6.1).

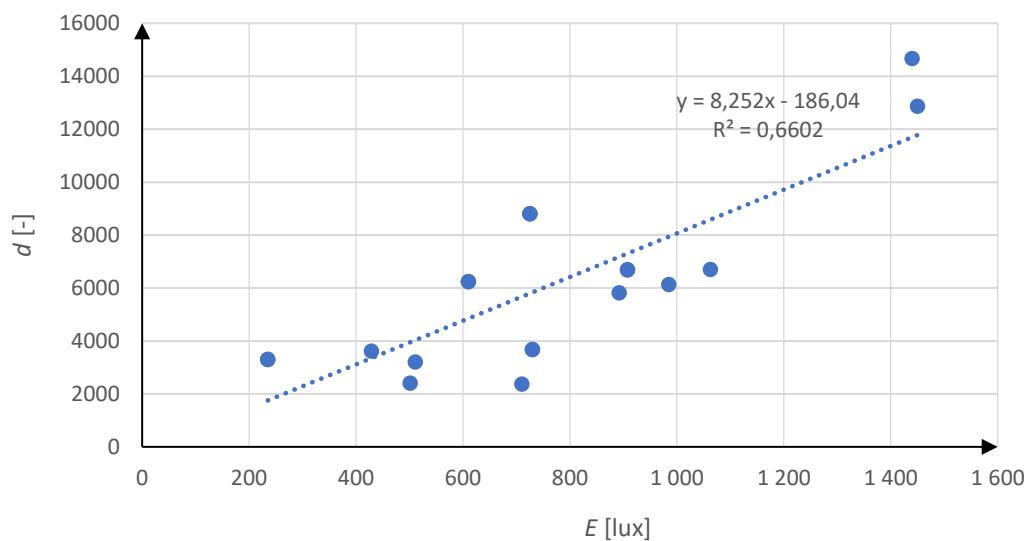
W tym celu postanowiono znaleźć zależność wartości wyznaczonych parametrów  $c$  i  $d$  funkcji potęgowej  $y = d \cdot x^c$ , a wartościami natężenia promieniowania słonecznego zmierzonymi

w jednym ustalonym punkcie. Zdecydowano o instalacji czujnika natężenia  $P_r$  na środku pomieszczenia (rysunek 3.1). Na rysunkach 5.3 i 5.4 przedstawiono te zależności dla okresu III.



Rys. 5.3. 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. 5.4. 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 5.3 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:

$$d = a \cdot E_r + b \quad (5.1)$$

gdzie  $a$  i  $b$  parametry wyznaczone statystycznie za pomocą procedur arkusza kalkulacyjnego, co opisano wcześniej. Przykład dla okresu III przedstawiono na rysunku 5.4.

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

$$E(x) = (aE_r + b) \cdot x^c \quad (5.2)$$

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 (5.2) wyznaczano dla każdego z 6 opisanych okresów. Formuły zawierające wartości parametrów  $a, b$  i  $c$ , przedstawiono w tabeli 5.1. 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 5.1 formuł została przedstawiona na rysunkach 5.6 oraz 5.7.

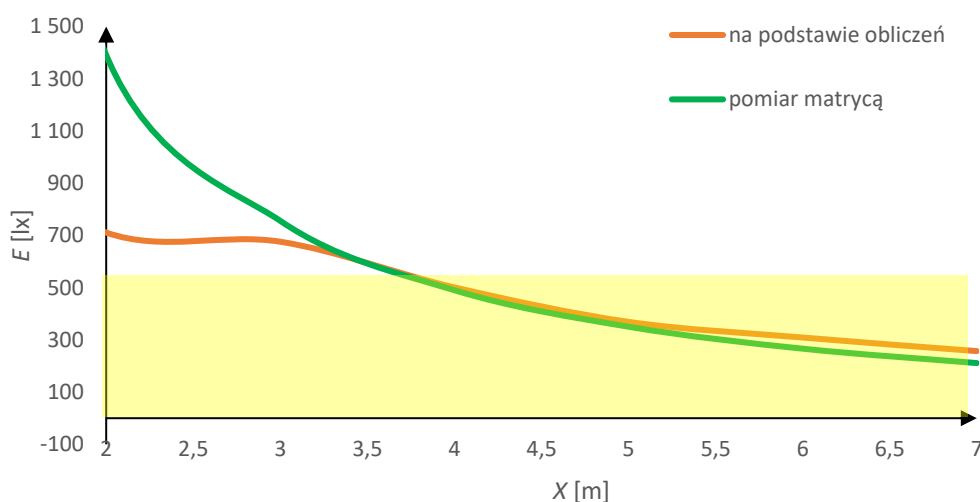
Tabela 5.1. Zestawienie wyznaczonych współczynników funkcji natężenia oświetlenia dla poszczególnych sześciu okresów w roku

Źródło: [opracowanie własne]

| Okres | Przedział dat   | Interpolowane natężenie oświetlenia [ $E_x$ ]                    |
|-------|---|--|
| I     | 21 maja – 20 sierpnia                                       | $E_1(E_{p1}, x) = (1,686 \cdot E_{p4} + 765,2) \cdot x^{0,810}$  |
| II    | 21 kwietnia – 20 czerwca<br>i 21 lipca – 21 sierpnia        | $E_2(E_{p2}, x) = (1,729 \cdot E_{p4} + 769,17) \cdot x^{0,990}$ |
| III   | 21 marca – 20 kwietnia<br>i 22 sierpnia – 22 września       | $E_3(E_{p3}, x) = (2,67 \cdot E_{p4} - 68,179) \cdot x^{0,796}$  |
| IV    | 21 luty – 20 marca<br>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<br>i 21 października – 21 listopada | $E_5(E_{p5}, x) = (2,498 \cdot E_{p4} + 112,79) \cdot x^{0,875}$ |
| VI    | 22 listopada – 20 stycznia                                  | $E_6(E_{p6}, x) = (2,167 \cdot E_{p4} + 157,83) \cdot x^{0,806}$ |

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. Jeden z przykładów porównania rozkładów natężenia oświetlenia zestawiono na rysunku 5.6.

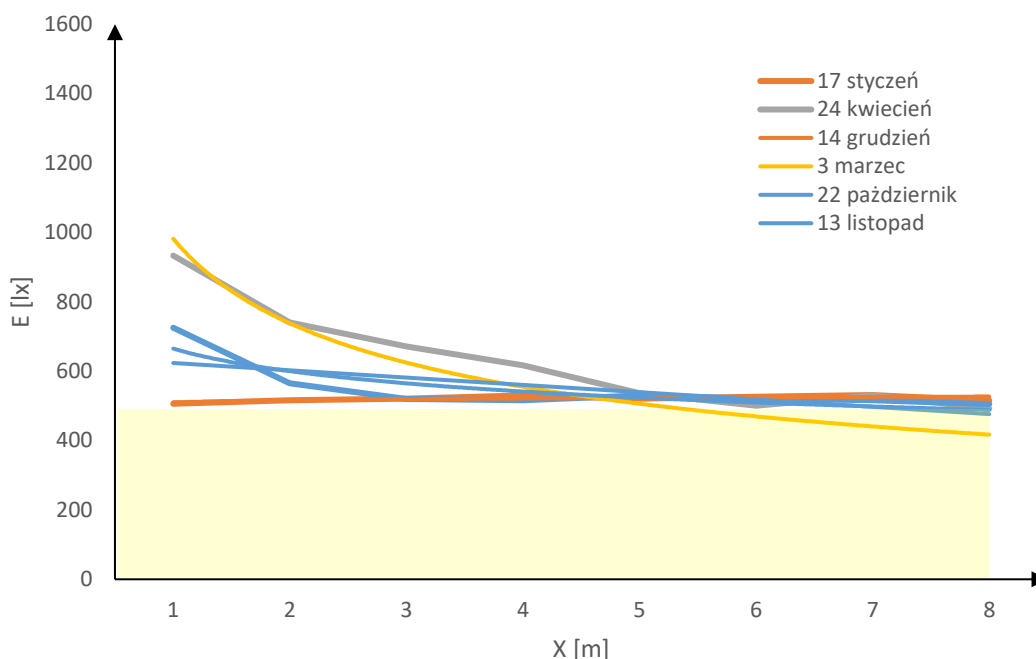


Rys. 5.6. Porównanie obliczonych i zmierzonych rozkładów natężenia oświetlenia w pomieszczeniu od strony S w dniu 16 marca

*Źródło: [opracowanie własne]*

Przeprowadzone pomiary z użyciem matrycy natężenia oświetlenia w pomieszczeniu, w którym zainstalowano system sterowania oświetleniem potwierdziły uzyskanie zakładanego efektu. Czujniki matrycy, a także czujnik regulujący  $P_r$  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  $P_r$ . Uzyskano zbliżone wartości natężenia oświetlenia na całej powierzchni pomieszczenia. Wyznaczone rozkłady natężenia oświetlenia, przedstawione na rysunku 5.7, są wynikiem działania opracowanego systemu sterowania oświetleniem.





Rys. 5.7. Rozkład natężenia oświetlenia z wykorzystaniem sterowania KNX w pomieszczeniu od strony S

Źródło: [opracowanie własne]

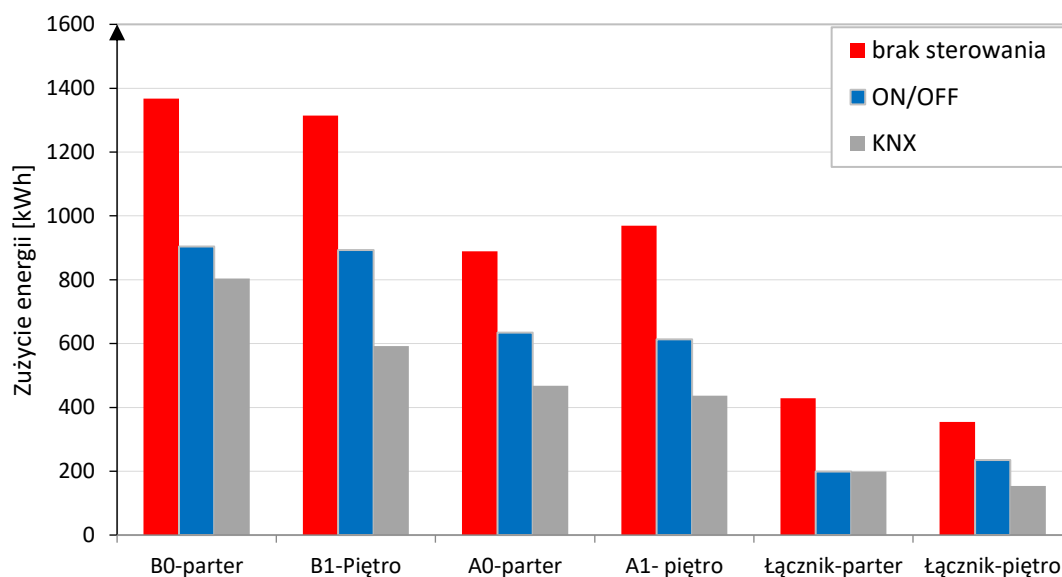
## 6. OSZCZĘDNOŚCI W ZUŻYCIU ENERGII ELEKTRYCZNEJ W INSTALACJACH OŚWIETLENIOWYCH

Na podstawie badań i uzyskanych danych rozkładu natężenia oświetlenia dokonano analizy zużycia i oszczędności energii elektrycznej w instalacjach oświetleniowych w obiekcie badawczym. Na rysunkach 6.1 i 6.2 przedstawiono wykresy zużycia energii dla różnych pomieszczeń oraz części budynku. Zestawiono zużycie energii w instalacji oświetleniowej bez automatycznego systemu sterowania oraz czujnikami PIR, a także zużycie w systemie sterowanym w standardzie KNX.

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).

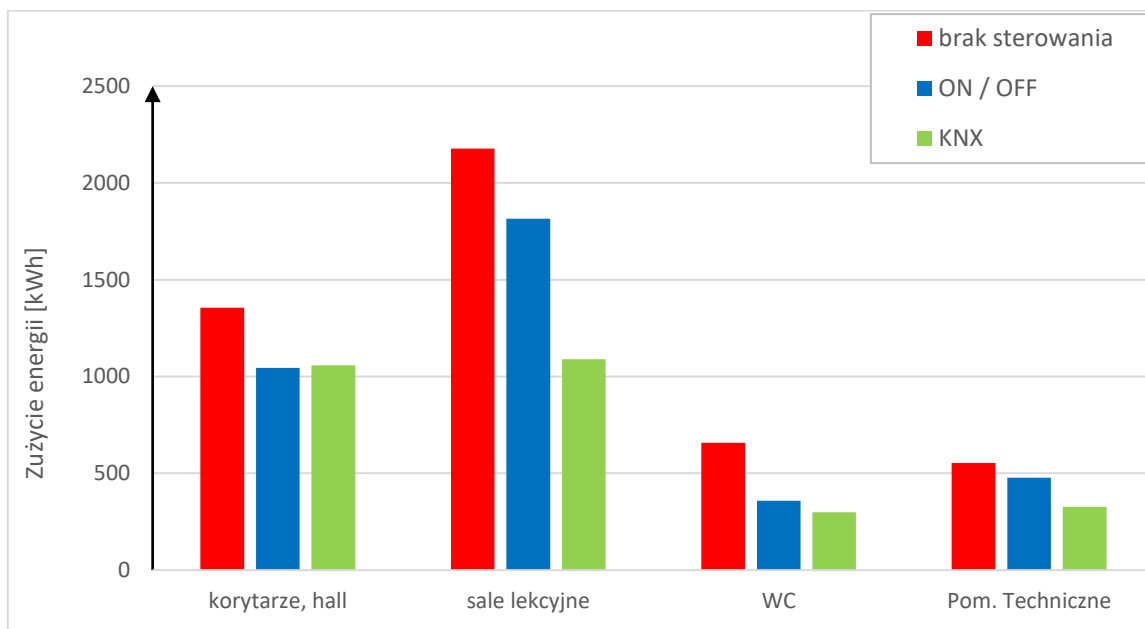
Na rysunku 6.1 przedstawiono zużycie energii elektrycznej w miesiącu grudniu, w instalacjach oświetleniowych, z podziałem na poszczególne części obiektu szkoły. Na każdym z wykresów pokazano zużycie energii elektrycznej dla trzech wspomnianych

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 6.2 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. 6.1. 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. 6.2. Zużycie energii w poszczególnych grupach pomieszczeń dla różnych wariantów sterowania

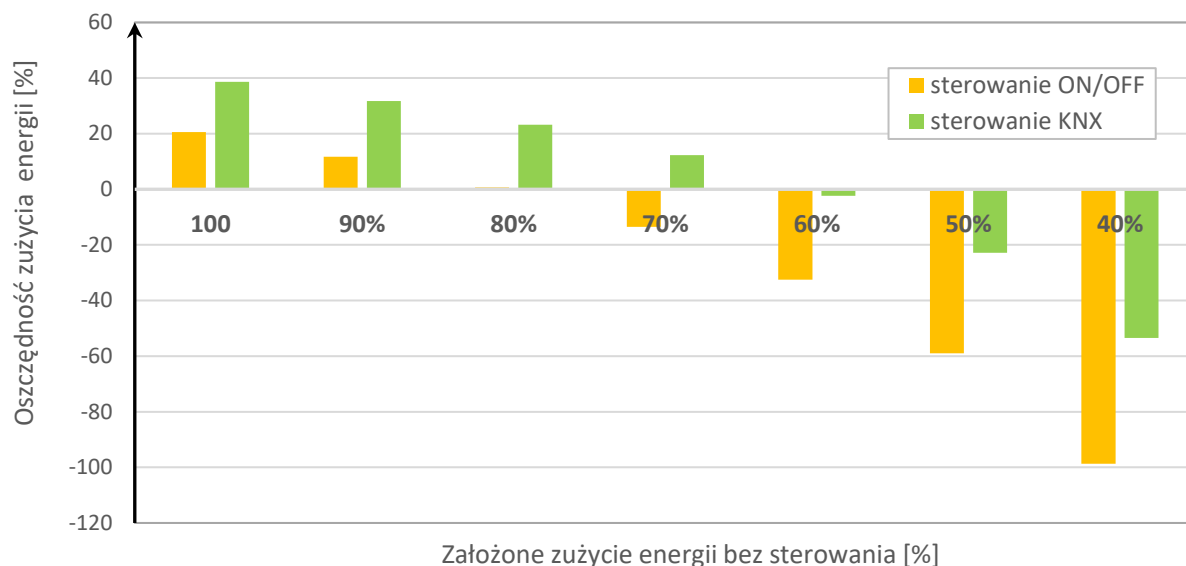
*Źródło: [opracowanie własne]*

Na rysunkach 6.3 i 6.4 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.

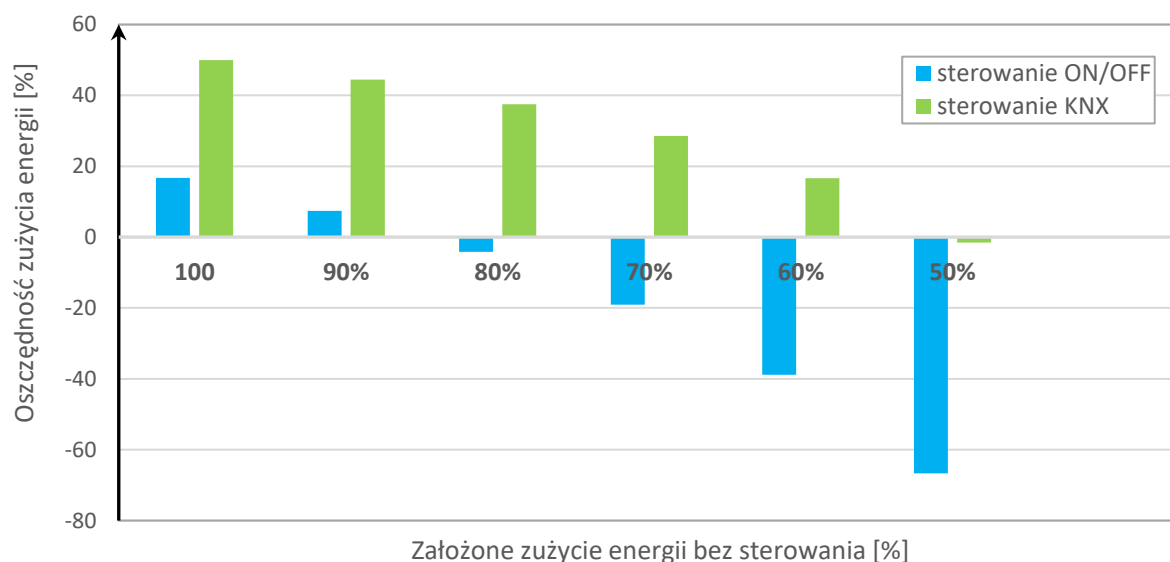
Oszczędność energii w miesiącu grudniu obliczono względem energii, jaka zostałaby zużyta w wariantcie bez sterowania w sytuacjach, w których użytkownicy obiektu korzystają z oświetlenia sztucznego na różne sposoby. Na przykład założone zużycie energii bez sterowania na poziomie 100% oznacza, że oświetlenie 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 przeanalizowanych publikacjach 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.



Rys. 6.3. Zależność uzyskanych oszczędności zużycia energii od założonego zużycia bez sterowania dla sterowania typu ON/OFF i sterowania KNX w scenariuszu I

Źródło: [opracowanie własne]



Rys. 6.4. Zależność uzyskanych oszczędności zużycia energii od założonego zużycia bez sterowania dla sterowania typu ON/OFF i sterowania KNX w scenariuszu II

Źródło: [opracowanie własne]

Natomiast zarówno w scenariuszu I jak i II wykazano większe oszczędności. W przypadku scenariusza I (rys. 6.3), sterowanie KNX umożliwia osiągnięcie oszczędności dla założonego zużycia energii bez sterowania powyżej 60%. W przypadku scenariusza II (rys. 6.4) 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. 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.

## 7. ANALIZA EKONOMICZNA ZASTOSOWANIA INTELIGENTNEGO SYSTEMU KNX DO STEROWANIA OŚWIETLENIEM

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 sterowania 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 (do najwyżej kilku lat). Określony jest on jako stosunek kosztów inwestycyjnych do korzyści, wyrażonych w postaci rocznej wartości zaoszczędzonej energii (7.1).

$$SPBT = \frac{K_{INW}}{K_E} \quad [-] \quad (7.1)$$

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 zestawienia przedstawionego w tabeli 7.1.

Tabela 7.1 Zestawienie elementów i kosztów modernizacji systemu sterowania oświetleniem w badanym obiekcie

Źródło: [opracowanie własne]

| Nazwa sprzętu / usługi              | Ilość / czas<br>szt. / [h] | Koszt całkowity netto $K_{INW}$<br>[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 szacunkowe oszczędności w zużyciu energii elektrycznej na oświetlenie, w skali roku, w wariantach I wynoszą 1048 kWh, natomiast w wariantach II 1972 kWh. Przyjmując uśrednioną cenę energii dla jednostek samorządu terytorialnego na poziomie 785 zł/MWh, oznacza łączną roczną oszczędność w wariantach II w miesiącu grudniu na poziomie 1548 zł. Dla obliczenia przyjęto koszt całkowity netto  $K_{INW} = 44950$  zł (tabela 7.1). 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 (7.1) 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  $NPV$  (7.2) będąca sumą wszystkich zdyskontowanych przepływów pieniężnych pomniejszoną o wartość inwestycji. Dzięki uwzględnieniu zmiany pieniądza w czasie metoda  $NPV$  pozwala na rzetelne określenie rentowności inwestycji:

$$NPV = \sum_{i=1}^N \frac{C F_i}{(1+r)^n} - I_0 \quad [\text{zł}] \quad (7.2)$$

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

$$DPP = N + \frac{|NPV|}{CF_i} \quad [-] \quad (7.3)$$

gdzie:

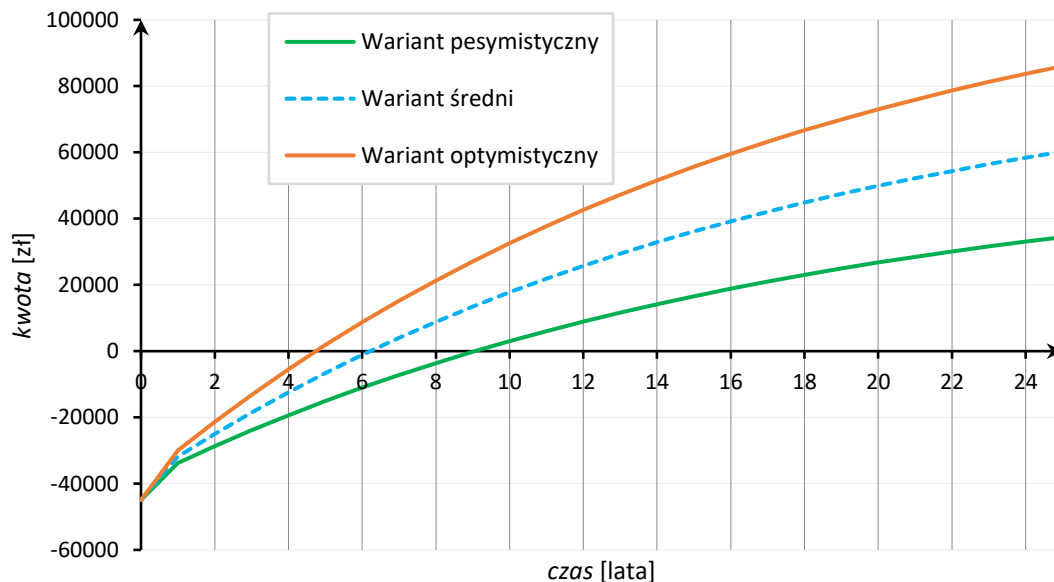
$N$  – liczba okresów przy której NPV jest ujemne, ale bliskie 0,

$NPV$  – 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 01.01.2023 - 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 7.1 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 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 uzyskany metodą *NPV* i wynosi około 4,5 roku.



Rys. 7.1. Czas zwrotu modernizacji systemu sterowania w badanym obiekcie dla trzech wariantów otrzymany z wykorzystaniem metody NPV

Źródło: [opracowanie własne]

## 8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

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 użytkownika 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 fotometryczna 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:

– 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.

– Wykorzystanie światła dziennego jest najefektywniejszym i najbardziej racjonalnym sposobem oszczędności zużycia energii na oświetlenie, zarówno z punktu widzenia ekonomicznego i komfortu użytkowania pomieszczeń.

Użytkownicy pomieszczeń bardzo często ograniczają dostęp światła dziennego do sal poprzez przysłonięcie lub zasłonięcie żaluzji, 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 zachowań 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 algorytmów sterowania wykorzystujących 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.

## 9. DOROBEK NAUKOWY AUTORA

### Przyznane Patenty naukowe

---

1. Filtr elektryczny wyższych harmonicznym prądu, regulowany przez indukcyjność i dobroć. Wasyl Hudym, Janusz Prusak, Ireneusz Chrabąszcz, Sławomir Ziarkowski, **Sławomir Sowa**, nr 121643. Data : 25.06.2020r.
2. Automatyczny system sterowania lampami oświetleniowymi – Wasyl Hudym, **Sławomir Sowa**, Sławomir Ziarkowski nr U 2018 07201. Data : 10.06.2019r.
3. Sterowany filtr pasywny, wyższych harmonicznym prądu - Wasyl Hudym, Marek Dudzik, **Sławomir Sowa**, Sławomir Ziarkowski nr U 2018 07200. Data : 10.06.2019r.

### Wykaz publikacji

---

1. Garbowski T., Cornaggia A., Zaborowicz M., **Sowa S.** „Computer-Aided Structural Diagnosis of Bridges Using Combinations of Static and Dynamic Tests: A Preliminary Investigation”. *Materials*, MDPI Vol. 16, Iss. 24, 2023, 7512
2. Tomczewski A., Mikulski S., Piotrowski S., **Sowa S.**, Wróbel K.. 2023. „*Multicriteria Optimisation of the Structure of a Hybrid Power Supply System for a Single-Family Housing Estate in Poland, Taking into Account Different Electromobility Development Scenarios*”. *Energies*, MDPI Vol 16, Iss. 10, 2023, 4132.

3. **Sowa S.**, Durski M.. 2022. „Cyberbezpieczeństwo w automatyce obiektowej”. Nowa Energia. Nr 4 /2022, s. 13-15.
4. **Sowa S.** 2020. „The implementation of renewable energy systems, as a way to improve energy efficiency in residential buildings”. Energy Policy Journal. Nr 2/2020, s. 19-36.
5. **Sowa S.** 2020. „Increasing energy efficiency of facilities using RES systems as a criteria of environmental quality improvement”. Journal of Ecological Engineering. Vol. 7, Iss. 21 (2020), s. 204- 209.
6. **Sowa S.** 2020. „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.
7. **Sowa S.** 2020. „Efficiency of the RES Hybrid Microinstallations Working in Energy Clusters”. MATEC Web of Conferences. EDP Sciences. Iss. 328, s. 03016.
8. **Sowa S.** 2019. „The Use of the Solar Radiation to Lower Consumption of the Electric Power for Lighting in Buildings”. Renewable Energy Sources:Engineering, Technology Innovation, Springer, Cham, No 6, s.633-647.
9. **Sowa S.** 2019. „Sposoby poprawy efektywności energetycznej instalacji oświetleniowych w budynkach użyteczności publicznej”. Electrical Engineering. No 98, s.137-147.
10. **Sowa S.** 2019. „Up-to-date solutions for reducing electricity consumption in lighting installations”. EDP Sciences. vol. 28, 01043 (2019).
11. **Sowa S.** 2019. „Lighting control systems using daylight to optimise energy efficiency of the building”. 2019 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE).
12. **Sowa S.** 2019. „The Potential Use of solar energy to improve energy efficiency of the facility”. Contemporary Issues of Heat and Mass Transfer. Nr 9/2019, s. 781-794.
13. **Sowa S.** 2019. „Capacity market and its impact on the development of distributed energy resources”. Energy Policy Journal. Nr 4/2019, s. 65-80.
14. **Sowa S.** 2018. „Increasing the energy efficiency of hybrid RES installations using KNX system”. Renewable Energy Sources:Engineering, Technology Innovation, Springer, Cham, No 2, s.387-394.
15. **Sowa S.**, Gielniak J. 2018. „Algorytmy sterowania oświetleniem w budynku szkoły z wykorzystaniem systemu KNX”. Electrical Engineering. No 96, s.153-162.
16. **Sowa S.**, Kamińska A., 2018. „Prognozowane zmniejszenie zużycia energii w budynku szkoły przez sterowanie oświetleniem w systemie KNX”. Przegląd Elektrotechniczny, s.193 – 197, 2/2018.
17. **Sowa S.**, Gielniak J. 2018. „Implementation of the lighting control algorithms in the KNX system”. Open Access proceedings In Information Technology, Computer Science and Mathematics.

18. **Sowa S.**, Gielniak J. 2018. „Wykorzystanie matrycy fotorezystorowej w badaniach rozkładu natężenia oświetlenia w pomieszczeniach”. Przegląd Elektrotechniczny, s.203 – 206, 10/2018.
19. **Sowa S.** 2018. „An improvement in the energetic efficiency of a building using daylight in the light control system”. EDP Sciences. vol 45 (2018) 00115.
20. **Sowa S.** 2018. „Improving the energy efficiency of lighting systems by the use of solar radiation”. EDP Sciences.
21. **Sowa S.** 2018 „Odnawialne źródła energii jako czynnik wpływający na poprawę efektywności energetycznej”. The Bulletin of The Mineral and Energy Economy Research Institute of the Polish Academy of Sciences. nr 105, s. 187–196.
22. **Sowa S.** „Natężenie światła dziennego w budynku szkoły”, Informatyka Automatyka Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska, s. 78-81, nr 3/2017.
23. **Sowa S.**, Zawiaczyński A. „Implementacja systemu sterowania oświetleniem w budynku szkoły”, Creative Time, s. 254-256.
24. **Sowa S.** „Zasadność stosowania systemu KNX do sterowania oświetleniem w budynku szkoły”. Rozdział w monografii naukowej „Zrozumieć naukę”, PROMOVENDI, ISBN: 978-83-946991-7-8, s. 102-110, 2017

---

### Wygłoszone referaty Konferencyjne

Zagraniczne – 3

Międzynarodowe – 11

Ogólnopolskie - 19

---

### W opracowaniu

1. Zgłoszenie patentowe: Analizator jakości energii w sieci 3-fazowej, 5-przewodowej.

Vasyl Hudym, **Sławomir Sowa**, Sławomir Ziarkowski