

RECENZJA
rozprawy doktorskiej

„Poprawa efektywności energetycznej instalacji oświetleniowych w obiektach
użyteczności publicznej”

Pana mgr inż. Sławomira Sowy

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawę formalną niniejszego opracowania stanowi pismo Pana prof. dr hab. inż. Zbigniewa Nadolnego Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Poznańskiej z dnia 20.09.2024r. z prośbą o opracowanie oceny rozprawy doktorskiej mgr inż. Sławomira Sowy pn.: *Poprawa efektywności energetycznej instalacji oświetleniowych w obiektach użyteczności publicznej*., zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki z dnia 17.09.2024 r. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Jarosław Gielniak prof. PP, natomiast promotorem pomocniczym jest dr inż. Grzegorz Dombek. Rozprawa została przesłana pocztą elektroniczną 24.09.2024 r., natomiast wersję wydrukowaną przesłaną pocztą otrzymałam dnia 17.10.2024 r.

Podstawę prawną stanowi Ustawa *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20 lipca 2018r. (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668) z późniejszymi zmianami, tj. *Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 10 marca 2023 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*, Dz. U. 2023 poz. 742, szczególnie Dział V *Stopnie i tytuł w systemie szkolnictwa wyższego i nauki*, Rozdział 2 *Stopień doktora*, Oddział 1 *Nadawanie stopnia doktora*, Art.187.

Merytoryczną ocenę dokonałam na podstawie treści przesłanej rozprawy.

2. Charakterystyka i ocena rozprawy doktorskiej

2.1. Struktura rozprawy

Rozprawa składa się z ośmiu numerowanych rozdziałów, które mają następujące tytuły: rozdział 1 – *Wprowadzenie* (2 strony), rozdział 2 – *Oświetlenie w aspekcie efektywności energetycznej* (67 stron), rozdział 3 – *Cel i Teza pracy* (2 strony), rozdział 4 – *Koncepcja układu sterowania oświetleniem* (1 strona), rozdział 5 – *Badania rozkładu natężenia oświetlenia* (30 stron), rozdział 6 – *Implementacja układu sterowania oświetleniem* (33 strony), rozdział 7 – *Podsumowanie wyników pracy* (3 strony), rozdział 8 – *Literatura* (11 stron). Przed numerowanymi rozdziałami poza *Spisem treści* zostały zamieszczone także następujące nienumerowane rozdziały: *Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń* (1 strona), *Streszczenie* (2 strony), *Abstract* w języku angielskim (1 strona).

Literatura liczy 153 pozycje, które są ułożone alfabetycznie. Kandydat jest autorem 13 publikacji literaturowych, ponadto cztery publikacje są współautorskie, przy czym w trzech z nich Kandydat jest pierwszym autorem, co łącznie stanowi 17 publikacji. Rozprawa zawiera 8 tabel i 61 rysunków, przy czym 51 rysunków znajduje się w rozdziale 5 i 6, które są bezpośrednio związane z własnymi pracami badawczymi Kandydata. Całość liczy 159 stron.

Praca jest starannie przygotowana, chociaż pojawiają się drobne błędy redakcyjne. Poszczególne rozdziały są dobrze opracowane i odpowiednio ilustrowane, zdjęciami elementów stanowisk badawczych, schematami blokowymi układów kontroli i sterowania oraz algorytmów pomiarów, a także graficzną interpretacją uzyskanych wyników obliczeniowych i eksperymentalnych w warunkach rzeczywistych. Poszczególne rozdziały są dobrze ze sobą powiązane i stanowią spójną całość. Co prawda tytuł rozdziału 4 nie w pełni jest zgodny z jego treścią. Brzmi on bowiem *Koncepcja układu sterowania oświetleniem*, natomiast przedstawia tak naprawdę skrótowy opis (streszczenie) przeprowadzonych prac badawczych i projektowanego systemu sterowania. Stanowi on mniej niż 1 stronę. Tytuł samej rozprawy jest dobrze sformułowany i odpowiednio odzwierciedla analizowany problem badawczy.

2.2 Treść i ocena merytoryczna rozprawy

Rozprawa doktorska reprezentuje dobry poziom naukowy przeprowadzonych prac o charakterze podstawowym i aplikacyjnym, oraz odpowiednio obrazuje wkład własny Kandydata w jej przygotowanie. Wprowadzenie w tematykę pracy, przegląd literatury, udokumentowanie podjęcia się przedmiotowych badań, sformułowanie tezy i celu pracy, oraz opis i analiza wykonanych badań teoretycznych i eksperymentalnych, walidacja modeli matematycznych opracowanych przez Kandydata w celu wykorzystania ich w układach sterowania oświetleniem w warunkach rzeczywistych, popartych wnikliwą analizą uzyskanych wyników, oraz sformułowane wnioski o charakterze podstawowym i aplikacyjnym, **stanowią o istotnej oryginalnej wartości naukowo – badawczej pracy.**

Układ treści jest przejrzysty i uporządkowany. Poszczególne rozdziały koncentrują się na poszczególnych podstawowych zagadnieniach rozprawy i odzwierciedlają chronologię przeprowadzonych badań. Kandydat na początku zamieszcza rozdział o charakterze przeglądowym, który odpowiednio uzasadnia wagę i istotę podjętej tematyki badawczo-wdrożeniowej. Następnie przedstawia zagadnienia o charakterze podstawowym wraz z opisem matematycznym wybranej problematyki. W dalszej części opisuje przeprowadzone badania eksperymentalne w rzeczywistym obiekcie. Opisuje **opracowane przez siebie narzędzie pomiarowe w postaci matrycy fotometrycznej pozwalające na wykorzystanie uzyskanych wyników pomiarowych do wyznaczenia rozkładów natężenia oświetlenia światłem dziennym w pomieszczeniach.** Rozkłady te z kolei odpowiednio zapisane matematycznie zostały wykorzystywane w układach sterowania oświetleniem światłem sztucznym w pomieszczeniach. **Istotą opracowanych przez Kandydata algorytmów sterowania było ustalenie korelacji pomiędzy natężeniem oświetlenia pochodzącym z centralnego czujnika zainstalowanego w pomieszczeniu, a rozkładami natężenia oświetlenia zarejestrowanymi podczas pomiarów. Wykonane prace badawcze dobrze ilustrują oryginalne osiągnięcia naukowo-badawcze Kandydata**

Rozdziały są odpowiednio ze sobą połączone i tworzą logiczną całość.

W rozdziale 1 pt. *Wprowadzenie* w sposób skrótowy uzasadniono podjęcie tematyki badawczej związanej z zagadnieniem poprawy efektywności energetycznej instalacji oświetleniowych w obiektach użyteczności publicznej. Kandydat sygnalizuje zakres rozważanych w pracy zagadnień. W szczególności koncentruje się na problematyce oszczędzania zużycia energii w budynkach użyteczności publicznej dzięki wykorzystaniu

systemów sterowania oświetleniem sztucznym skojarzonych z miernikami oświetlenia światłem dziennym.

Rozdział 2 zatytułowany *Oświetlenie w aspekcie efektywności energetycznej* jest obszernym rozdziałem przeglądowym w obszarze szeroko pojętej efektywności energetycznej w budownictwie zwłaszcza w odniesieniu do oświetlenia i zużycia energii elektrycznej do celów oświetlenia światłem sztucznym. W rozdziale tym Kandydat zwraca uwagę na stosowanie właściwego oświetlenia w pomieszczeniach, jako jednego z istotnych czynników zapewniających właściwe warunki pracy, odpoczynku i użytkowania pomieszczeń. Co istotne podkreśla rolę wykorzystania oświetlenia światłem dziennym dzięki oddziaływaniu promieniowania słonecznego na pomieszczenia i skojarzeniu wykorzystania tego oświetlenia przy współpracy z oświetleniem światłem sztucznym. Wykorzystanie oświetlenia światłem dziennym jest bardzo istotnym zagadnieniem prac badawczych i wdrożeniowych na świecie, zarówno ze względu na poprawę komfortu użytkowania pomieszczeń, jak i oszczędność energii elektrycznej wykorzystywanej do zasilania źródeł światła. Należy przy tym podkreślić, że **tematyka wykorzystania oświetlenia światłem dziennym i jego integracja z instalacjami oświetlenia światłem sztucznym jest ciągle rozważana w sposób niewystarczający w badaniach naukowych i pracach wdrożeniowych w kraju. Należy więc podkreślić, że podjęcie tej tematyki w pracach naukowo – badawczych Kandydata zasługuje na szczególne uznanie i przynosi wyraźny wkład w rozwój badań i aplikacyjność ich wyników w problematyce oświetleniowej, w szczególności w odniesieniu do poprawy efektywności energetycznej instalacji oświetleniowych w obiektach użyteczności publicznej, jakimi są szkoły.**

W rozważanym rozdziale 2 Kandydat opisał podstawowe pojęcia związane z efektywnością energetyczną w budownictwie i jego systemach energetycznych. Odniósł się do podstawowych aktów i uregulowań prawnych, europejskich i krajowych wymuszających działania na rzecz poprawy efektywności energetycznej, w tym do zapisów rozporządzeń dotyczących wyznaczania charakterystyki energetycznej budynków i warunków technicznych jakim powinny podlegać budynki i ich usytuowanie. Opisał klasy energetyczne budynków i ilościowe kryteria ich klasyfikacji w warunkach krajowych. Jednakże, należy zauważyć że w tym przypadku opis wyprzedził rzeczywistość, bowiem podane klasy i kryteria nie są jeszcze obowiązujące, a obecnie ich stosowalność, zakres i szczegółowe wymagania są w fazie końcowych uzgodnień. Rozdział 2.1.2 powinien być więc napisany w trybie przypuszczającym, a nie dokonanym. W rozdziale tym Kandydat rozważał też czynniki wpływające na efektywność energetyczną budynków oraz różne metody ograniczenia zużycia energii w budynkach.

W kolejnej części rozdziału 2 Kandydat skoncentrował się na zagadnieniach oświetlenia pomieszczeń, w tym na parametrach i kryteriach determinujących jakość oświetlenia. W sposób przejrzysty i usystematyzowany przedstawił poszczególne zagadnienia istotne dla tematyki pracy. Kandydat przedstawił podstawy fizyczne oddziaływania promieniowania słonecznego na budynek pod kątem oświetlenia światłem dziennym. Opisał przyrządy pomiarowe do wyznaczania parametrów oświetlenia. Rozważania odnośnie do oświetlenia wewnątrz zostały podzielone na opis wykorzystania światła dziennego i czynników wpływających na jego dostępność oraz na wykorzystanie sztucznych źródeł oświetlenia, i ich integrację. Nasuwa się kilka pytań szczegółowych odnośnie do rozważań przedstawionych w podrozdziałach 2.2.1, 2.2.2, 2.2.4 i 2.2.6, które zostały zamieszczone w kolejnej części recenzji tj. w punkcie 2.3.

W punkcie 2.3 rozdziału 2 Kandydat rozważa sterowanie światłem sztucznym, w tym w szczególności sposoby sterowania oświetleniem. Opisuje systemy sterowania ręcznego i systemy zautomatyzowane, w tym system z centralnym sterowaniem KNX, który jest standardowym systemem automatyki budynkowej i jest wykorzystywany do inteligentnego

sterowania oświetleniem. Rozważa stosowane metody i warunki graniczne współpracy systemu sterowania oświetleniem sztucznym z oświetleniem światłem dziennym w układach sterujących systemu KNX. Rozdział ten obrazuje dużą wiedzę podstawową Kandydata z zakresu podstaw oświetlenia światłem dziennym oraz stosowanych metod sterowania oświetleniem wewnątrz pomieszczeń.

W następnym **rozdziale 3** Kandydat sformułował problem naukowy, cel i tezę pracy oraz określił ich zakres i innowacyjność podjętych przez niego badań. Kandydat podjął się istotnej problematyki naukowej, która powinna dać mierzalne efekty aplikacyjne. Prowadzone badania mają skutkować ograniczeniem zużycia energii elektrycznej w budynkach, w szczególności w budynkach użyteczności publicznej o charakterze edukacyjnym (szkoły), dzięki zastosowaniu odpowiedniego układu sterowania oświetleniem w pomieszczeniach, skojarzonego naturalnym oświetleniem światłem słonecznym. Aby zrealizować postawiony cel Kandydat podjął się opracowania algorytmu sterowania oświetleniem, które zapewni spełnienie wymaganych parametrów oświetleniowych miejsc pracy w budynkach edukacyjnych. Kandydat sformułował główną tezę pracy, która brzmi „*Efektywność energetyczną instalacji oświetleniowych można poprawić poprzez zastosowanie algorytmu sterowania wykorzystującego formuły matematyczne opisujące rozkłady natężenia oświetlenia wyznaczone przy użyciu matrycy fotometrycznej*”. Przedstawił kolejne zadania, które należy wykonać, aby udokumentować postawioną tezę rozprawy.

Sformułowany **problem badawczy, cel i tezy pracy jasno definiują zakres koniecznych do przeprowadzenia badań i wykazują możliwość osiągnięcia korzyści aplikacyjnych oraz obrazują wysoką jakość podjętych prac w zakresie badań dotyczących stosowania efektywnych energetycznie technik oświetleniowych w budynkach**. Można jednakże zauważyć, iż celowe byłoby bardziej szczegółowe wskazanie na różnice pomiędzy opracowanym przez Kandydata algorytmem sterowania, a istniejącymi i obecnie wykorzystywanymi algorytmami sterowania w systemach automatyki budynkowej. Należy więc jednoznacznie stwierdzić:

1. Jakie są podstawowe różnice pomiędzy standardowym algorytmem sterowania w systemie automatyki budynkowej KNX, a algorytmem i metodą sterowania Kandydata?

Kolejny **rozdział 4** ma tytuł „*Koncepcja układu sterowania oświetleniem*”. Jednakże, tytuł ten nie w pełni odpowiada jego zawartości. Rozdział jest bardzo krótki (nieco ponad pół strony) i zawiera cel pracy, uzasadnienie stworzenia matrycy fotometrycznej i jej podstawową zasadę działania, krótki opis zastosowania czujnika natężenia oświetlenia i przysyłania uzyskanych informacji (danych) do układu sterowania oświetleniem. Jednakże, przedstawienie koncepcji układu sterowania wymagałoby przedstawienia dodatkowych informacji, chociażby opisu koncepcji budowy układu i jego składowych, określenia warunków działania i możliwych wariantów sterowania.

Następny **rozdział 5** pt. „*Badania rozkładu natężenia oświetlenia*” jest istotny do zilustrowania wkładu własnego Kandydata w przeprowadzone badania, do pokazania złożoności procesu badawczego determinującego osiągnięcie oryginalnego celu badawczego - naukowego. W rozdziale tym opisana została metodyka prowadzenia badań w celu rozwiązania postawionego problemu. Nasuwa się jednak kilka pytań i uwag ogólnych, oraz pytania szczegółowe, te ostatnie zostały przedstawione w punkcie 2.3 tej recenzji.

Kandydat opisuje zastosowaną metodę pomiarową jako istotny element swojej metodyki badawczej. Metoda ta opiera się na wykorzystaniu do pomiarów opracowanej przez Kandydata bezprzewodowej matrycy fotometrycznej. Matryca ta daje możliwość prowadzenia jednoczesnego pomiaru natężenia oświetlenia w 16 punktach danego

pomieszczenia z możliwością ciągłej akwizycji danych w czasie rzeczywistym. Nasuwa się pytanie:

2. Z jaką dokładnością są rejestrowane wartości natężenia światła i czy są rejestrowane także inne parametry innymi urządzeniami pomiarowymi w czasie badań, np. cieplne, oraz czy została przeprowadzona analiza niepewności błędów pomiarowych?

Metodykę prowadzenia badań Kandydat opracował sam, co jest jednym z ważnych elementów oceny Jego osiągnięcia naukowego.

W dalszej części rozdziału 5 Kandydat przedstawił miejsce prowadzenia badań i implementacji systemu sterowania oświetleniem. Miejscem tym są pomieszczenia w budynku Zespołu Szkół nr 1 w Swarzędzu koło Poznania. Kandydat scharakteryzował szczegółowo wybrane do badań pomieszczenia w dwóch głównych skrzydłach budynku szkoły. Następnie w punkcie 5.3 opisał budowę i schematy blokowe autorskiej bezprzewodowej matrycy pomiarowej oraz układu akwizycji danych z czujników pomiarowych, a także procedurę i algorytm pomiaru natężenia oświetlenia. Kandydat opisał szczegółowo oprogramowanie matrycy pomiarowej, sposób zbierania i transmisji danych pomiarowych do serwera, ich archiwizację oraz połączenie z obiorcą końcowym (na komputerze). Kandydat stwierdził, iż „zastosowanie cyfrowych czujników natężenia światła ... znacznie zmniejszyło niepewność pomiarową” (str.90). Stwierdzenie to po raz kolejny nasuwa postawione już wcześniej pytanie ogólne 2, czyli:

Czy przeprowadzono analizę niepewności pomiarów i jakie są wyniki tej analizy?

Kolejna część rozdziału 5.3.4 przedstawia metodykę prowadzenia pomiarów (słowo *metodologia*, które użył Kandydat to nie to samo co metodyka, a to właśnie metodyka badań jest w rzeczywistości opisywana w punkcie 5.3.4). Kandydat wskazał wady ręcznego pomiaru oświetlenia, pokazując iż pomiar ręczny cechuje się trudnościami w uchwyceniu i odwzorowaniu wpływu silnie zmiennych w krótkich przedziałach czasowych warunków pogodowych: zachmurzenia – natężenia promieniowania słonecznego na warunki oświetlenia pomieszczeń. Wykazał, że zastosowanie autorskiej matrycy fotometrycznej umożliwia wykonywanie precyzyjnych pomiarów we wszystkich (16) punktach pomiarowych w danym pomieszczeniu równocześnie, przy zachowaniu stabilności położenia czujników natężenia oświetlenia. Co więcej zastosowane oprogramowanie umożliwia wyznaczanie w czasie rzeczywistym rozkładów natężenia oświetlenia w danym pomieszczeniu (w poszczególnych punktach) i ich wizualizację.

W kolejnej części rozdziału w punkcie 5.4 zostały opisane badania rozkładu natężenia oświetlenia w wybranych pomieszczeniach (jedno zlokalizowane od strony południowej, drugie północnej) budynku. Pomiary były dokonywane od marca 2017 roku do czerwca 2019 roku okresowo, kiedy natężenie oświetlenia w pomieszczeniu w jego najdalszym miejscu od okna było poniżej granicznej (dolnej) wartości (500 luxów). Pomiary natężenia oświetlenia były dokonywane w sposób ręczny, jak i przy wykorzystaniu opracowanej i stworzonej przez Kandydata matrycy fotometrycznej. Różnice pomiędzy pomiarami wykonanymi tymi dwoma sposobami dla pomieszczeń o lokalizacji południowej i północnej ilustrują rysunki 5.15 i 5.16. Przeprowadzenie badań miało na celu wykorzystanie otrzymanych wyników natężenia oświetlenia do **opracowania rozkładów natężenia oświetlenia w pomieszczeniu**, co z kolei **dało podstawę do opracowania algorytmów sterowania sztucznym oświetleniem**, i co **stanowi istotny oryginalny wkład Kandydata w rozwój badań nad zagadnieniami sterowania oświetleniem światłem sztucznym wewnątrz pomieszczeń z uwzględnieniem zmiennego w czasie oddziaływania światła dziennego**.

Opracowane rozkłady krzywych natężenia oświetlenia światłem dziennym w różnym

czasie, w konsekwencji w różnych warunkach oddziaływania promieniowania słonecznego (zmienne zachmurzenie lub jego brak), w funkcji głębokości pomieszczeń, zostały przedstawione w postaci graficznej na rysunkach 5.17 – 5.28. Nasuwa się w tym miejscu podstawowe pytanie:

3. Jakiego czasu (pory dnia, godziny) dotyczą wykresy na rys. 5.17 – 5.26 i co oznacza sformułowanie, iż rys. 5.27 i 5.28 prezentuje: *rozkłady średniego natężenia światła dziennego odpowiednio dla poszczególnych miesięcy w roku, czyli jaką metodę uśredniania zastosowano?*

Pytanie to jest bardzo istotne, bowiem pozycja Słońca na nieboskłonie wyznaczona kątem wzniesienia i kątem azymutalnym Słońca, wpływa na dostępność promieniowania słonecznego, a w konsekwencji na oświetlenie światłem dziennym. Odpowiedź na to pytanie ułatwi interpretację wyników prac badawczych Kandydata, w szczególności tych opracowanych w postaci rozkładów średniego natężenia światła zamieszczonych w rozdziale 5 na rys. 5.15–5.28, a także w kolejnym rozdziale 6, gdzie również prezentuje rozkłady natężenia światłem dziennym w pomieszczeniach.

Kolejny **rozdział 6** przedstawia ważne informacje istotne do oceny indywidualnego osiągnięcia naukowego Kandydata. Rozdział ten opisuje implementację opracowanego przez Kandydata systemu sterowania oświetleniem w wybranych pomieszczeniach obiektu szkolnego i wyniki działania tego systemu w warunkach rzeczywistych. Kandydat proponuje wykorzystanie opracowanego przez siebie układu sterowania w systemie standardowej automatyki budynkowej KNX. Przedstawia opracowany układ sterowania, jego elementy i ich lokalizację w rozważanych pomieszczeniach wraz z opisem ich działania. Opisuje i pokazuje w formie graficznej algorytm stworzonego autorskiego systemu sterowania oświetleniem w pomieszczeniu, który wykorzystuje opracowane formuły (zależności matematyczne) opisujące rozkłady natężenia oświetlenia w danym miejscu pomieszczeniu (w danej odległości od okna).

W punkcie 6.3 Kandydat przedstawił implementację rozkładów natężenia oświetlenia w systemie automatyki budynkowej KNX. W pierwszej części opisał i przedstawił w formie graficznej wyniki pomiarów natężenia oświetlenia w badanych pomieszczeniach. Wyniki te stały się podstawą do opracowania rozkładów natężenia oświetlenia (co opisano też w rozdziale 5, punkt 5.4). Otrzymane rozkłady opisano odpowiednimi zależnościami matematycznymi. W celu uproszczenia opisu matematycznego (zmniejszenia liczby równań) zmniejszono liczbę okresów odniesienia przy opisie rozkładów natężenia oświetlenia do 6 charakterystycznych okresów w skali roku. Okresy te odpowiadają warunkom zbliżonego pozornego ruchu Słońca po nieboskłonie. Przypisane tym okresom zależności matematyczne opisujące rozkłady natężenia oświetlenia w pomieszczeniach przedstawiono w Tabeli 6.1. Można zauważyć, że w tabeli tej prawdopodobnie źle zapisano okres II. Na rysunkach 6.4 – 6.9 przedstawiono charakterystyki rozkładów natężenia oświetlenia w pomieszczeniu od strony południowej w funkcji odległości od okna w wybranych dniach kolejno w 6 charakterystycznych okresach w skali roku (w okresach wyznaczonych przez zbliżony przebieg „wędrówki” Słońca po pozornym nieboskłonie).

Niestety w legendach rysunków 6.4 – 6.9 popełniono błędy, nie wszystkie dni odpowiadają ich przynależności do okresu wskazanego w tytule rysunku, np. dzień 25 maja, 19 czerwca pojawia się na 3 kolejnych rysunkach (6.4, 6.5 i 6.6) odpowiadających trzem różnym okresom. Często kolorom danych dni roku opisanym w legendzie rysunku trudno jest przypisać kolory krzywych, czyli odpowiednie dni. Na rysunku 6.9 można rozróżnić 7 krzywych odpowiadających 7 dniom, natomiast legenda wskazuje na uwzględnienie aż 12 dni. Niestety utrudnia to interpretację uzyskanych wyników. Dlatego też sformułowano następujące zalecenie:

4. Proszę wyjaśnić niejasności na rys. 6.4 – 6.9.

Opracowane przez Kandydata zależności matematyczne opisujące odpowiednie rozkłady natężenia oświetlenia światłem dziennym w funkcji głębokości pomieszczeń dla 6 ustalonych charakterystycznych okresów roku kalendarzowego zostały zaimplementowane do systemu sterowania sztucznym oświetleniem w pomieszczeniach. Rysunek 6.12 przedstawia schemat blokowy opracowanego układu regulacji oświetlenia i w sposób przejrzysty obrazuje zasadę sterowania oświetleniem pomieszczeń. Podstawą działania systemu sterowania jest wykorzystanie opracowanych przez Kandydata formuł matematycznych opisujących rozkłady natężenia w danych warunkach pogodowych przy jednoczesnym odczycie pomiaru natężenia światła przez jeden czujnik centralny w czasie rzeczywistym w celu wyznaczenia natężenia oświetlenia we wszystkich (16) określonych miejscach pomieszczenia w tym czasie. **Stanowi to istotne osiągnięcie naukowo – badawcze Kandydata uwieńczone bezpośrednim wdrożeniem wyników badań**, co odpowiednio wykazano w punkcie 6.4 rozdziału.

W punkcie 6.4 rozdziału 6 **Kandydat przedstawił weryfikację działania opracowanego układu sterowania oświetleniem w warunkach rzeczywistych**. W celu weryfikacji działania układu sterowania przeprowadził badania porównawcze przykładowych rozkładów natężenia oświetlenia wyznaczonych na podstawie opracowanych przez siebie zależności matematycznych z wynikami pomiarów, które zostały uzyskane w czasie rzeczywistym przy użyciu matrycy fotometrycznej. Przykładowe porównania rozkładów natężenia oświetlenia otrzymane na podstawie obliczeń (wykorzystanie opracowanych formuł matematycznych) i otrzymane z pomiarów przy wykorzystaniu matrycy pokazano na rysunkach 6.13, 6.14 oraz 6.15. Uzyskane wyniki wskazują na bardzo dobrą zgodność rozkładów natężenia oświetlenia otrzymanych metodą obliczeniową i pomiarową w przypadku głębokości pomieszczenia większych niż 3 metry. Gdy poziom natężenia oświetlenia światłem dziennym spada poniżej wartości granicznej (równej 500 luxów), rozkłady obu krzywych pokrywają się. Natomiast przy małych odległościach od okna wielkości natężenia oświetlenia otrzymane dwoma metodami różnią się znacznie. Wskazuje to na celowość modyfikacji modelu obliczeniowego zastosowanego do sterowania światłem sztucznym, gdyby model ten miał być również wykorzystywany do analiz zacienienia pomieszczeń wskutek nadmiernego oświetlenia światłem dziennym. Jednakże, to zagadnienie nie było przedmiotem badań Kandydata, ale może czy nawet powinno stanowić przyczynek do dalszych prac badawczych.

Kolejny punkt 6.5 dotyczy oszczędności energii, które mogłyby być osiągnięte, gdyby opracowany przez Kandydata układ sterowania oświetleniem został zastosowany w praktyce rozważanym w budynku szkolnym. Dzięki przeprowadzonym pomiarom natężenia oświetlenia światłem dziennym w wybranych pomieszczeniach, opracowanym rozkładom natężenia światła i możliwości ich implementacji w systemie sterowania oświetleniem, Kandydat mógł przeprowadzić obliczenia oszczędności energii w obiekcie, a następnie wykorzystać je do analizy ekonomicznej. Przyjmując graniczne minimalne wartości natężenia oświetlenia w pomieszczeniach możliwe jest automatyczne włączanie i wyłączanie oświetlenia, co jak wykazał Kandydat przynosi wyraźne oszczędności w zużyciu energii, a w konsekwencji oszczędności finansowe. W Tabeli 6.3 Kandydat przedstawił wartości natężenia oświetlenia zewnętrznego i wewnętrznego, dla których wyznaczył odpowiednie stany pracy oświetlenia. Na podstawie przeprowadzonych badań w odpowiedni sposób powiązał warunki oświetlenia światłem dziennym z rozkładem natężenia światła w salach lekcyjnych i wyznaczył graniczne wartości natężenia oświetlenia w kolejnych rzędach wybranego pomieszczenia. Rozważanie lokalne (miejscowe) rozszerzył i uogólnił do całego obiektu szkolnego. Zaproponował, aby opracowane przez niego rozwiązanie sterowania oświetleniem w pomieszczeniach wprowadzić do systemu automatyki budynkowej KNX i zastosować oddzielnie na poszczególnych kondygnacjach, odpowiednich segmentów budynku. Przedstawił wstępny projekt magistrali systemu sterowania oświetleniem dla wybranej kondygnacji i segmentu budynku w standardzie

KNX. Następnie przeprowadził obliczenia zużycia energii elektrycznej w poszczególnych pomieszczeniach, z uwzględnieniem funkcjonowania obiektu bez systemu sterowania (stan obecny, referencyjny), jak dwóch różnych wariantów pracy systemu sterowania oświetleniem, odpowiednio przenosząc je na rozważania w odniesieniu do całego obiektu edukacyjnego. Jak można było oczekiwać, oszczędności w zużyciu energii przy wykorzystaniu opracowanego przez Kandydata systemu sterowania, który wykorzystuje odpowiednie czujniki natężenia światła oraz regulację oświetlenia z uwzględnieniem rozkładu natężenia światła dziennego w pomieszczeniach, są wyraźnie wyższe (dwukrotnie) niż w przypadku zastosowania standardowego układu sterowania z czujnikami obecności ludzi w pomieszczeniach. Kandydat rozważył też dwa scenariusze lokalizacji układów sterujących oświetleniem, a mianowicie tylko w salach lekcyjnych, jak i w całym obiekcie.

Zastosowanie systemu sterowania oznacza odpowiednie nakłady finansowe na taką inwestycję i jej eksploatację, dlatego też Kandydat przeprowadził analizę efektywności ekonomicznej zaproponowanych rozwiązań modernizacji oświetlenia w obiekcie szkolnym, polegające na zastosowaniu inteligentnego systemu automatyki budynkowej KNX wraz z autorskim modułem sterowania oświetleniem światłem sztucznym w budynku szkolnym, co opisał w punkcie 6.6. Przedstawił metody obliczeniowe zastosowane w analizie ekonomicznej i uzyskane wyniki obliczeń, które jak można było oczekiwać wskazują na celowość zastosowania autorskiego systemu sterowania oświetleniem w budynku.

Rozdział 7 zawiera podsumowanie wyników pracy i wnioski końcowe, oraz przedstawia możliwe kierunki dalszych badań.

Podsumowując należy podkreślić **bardzo duży wkład pracy Kandydata w przygotowanie i opracowanie zebranego materiału do stworzenia rozprawy doktorskiej**. Kandydat wykonywał w czasie ponad dwóch lat bardzo **pracochłonne badania eksperymentalne**, w tym prace pomiarowe i akwizycyjne natężenia oświetlenia światłem dziennym w wybranych pomieszczeniach budynku szkolnego w Swarzędzu. **W celu usprawnienia wykonywania pomiarów, jak i ich dokładności, stworzył matrycę fotometryczną do równoczesnego prowadzenia pomiarów w 16 punktach pomiarowych danego pomieszczenia**. Następnie wykorzystując zgromadzone dane opracował zależności matematyczne opisujące rozkłady natężenia oświetlenia w pomieszczeniach w określonych warunkach pogodowych. Zależności te posłużyły mu do stworzenia algorytmów sterowania źródłami światła sztucznego w pomieszczeniach. Dzięki **opracowaniu systemu sterowania** i zaadaptowania go do działania w systemie automatyki budynkowej KNX, **możliwe jest utrzymanie wymaganej minimalnej wartości natężenia oświetlenia** na całej powierzchni pomieszczenia w danym czasie. Co więcej zastosowanie opracowanego systemu sterowania zapewnia uzyskanie oszczędności energii elektrycznej, poprawiając w ten sposób efektywność energetyczną całego budynku.

Istotną wartością naukową pracy jest fakt, iż łączy ona różne podstawowe metody badawcze służące do realizacji postawionego celu naukowego i aplikacyjnego. Przeprowadzenie szerokiego zakresu badań eksperymentalnych, analiza i opracowanie wyników w postaci uogólnionych zależności (formuł) matematycznych, które dają podstawę do ich wprowadzenia do algorytmów sterowania urządzeniami i całymi systemami, a następnie walidacja opracowanych algorytmów i kompleksowego systemu sterowania w warunkach rzeczywistych, gwarantują wiarygodność naukową uzyskanych wyników, sformułowanych wniosków i aplikacyjność zaproponowanych rozwiązań. Chociaż, w niektórych miejscach pojawiają się pewne niejasne zapisy (np. legendy na rysunkach niepasujące do ich przekazu, itp.), to **przedstawione badania i uzyskane wyniki stanowią o istotnej wartości poznawczej i aplikacyjnej rozprawy**, co pozwala stwierdzić, iż **postawiony problem badawczy został rozwiązany, udokumentowana została prawdziwość**

postawionej tezy i cel badawczy został zrealizowany.

Rozprawa dotyczy bardzo istotnego zagadnienia zarówno badawczo – naukowego, jak i aplikacyjnego. Problem modelowania oddziaływania światła słonecznego na oświetlenie pomieszczeń w budynku jest bardzo istotnym zagadnieniem związanym z zapewnieniem właściwego komfortu użytkownika budynków, a także z ograniczeniem energochłonności budownictwa, i to nie tylko w kraju. Zagadnienie możliwości wykorzystania oświetlenia światłem dziennym jest zagadnieniem łączącym obszar energetyki, budownictwa, elektrotechniki, automatyki i inżynierii środowiska. Problematyka ta jest niedoceniana i niewystarczająco opisana w literaturze, a także rzadko rozważana w analizach teoretycznych, przebadana w warunkach laboratoryjnych i rzeczywistych obiektach.

Zwykle zagadnienie oświetlenia światłem dziennym jest pomijane w analizach poprawy efektywności energetycznej budynków różnego typu, co w konsekwencji powoduje nie przywiązywanie zbyt dużej wagi do uwzględnienia oświetlenia światłem dziennym już na etapie projektowania budynku i jego instalacji. Brakuje zaleceń, co do tworzenia rozwiązań oświetleniowych w budynkach, które dawałyby priorytet oświetleniu światłem dziennym. Jest to bardzo istotne w budynkach użyteczności publicznej, w tym w szczególności w obiektach edukacyjnych: szkołach, przedszkolach, uczelniach. Brakuje również metodyki wyznaczania efektów ilościowych wykorzystania oświetlenia światłem dziennym, w tym spadku ilości energii elektrycznej wymaganej do zasilania źródeł światła sztucznego. Dlatego też **podjęcie przez Kandydata tematyki rozprawy związanej z poprawą efektywności energetycznej instalacji oświetleniowych w obiektach użyteczności publicznej uważam za bardzo celowe i przemyślane. Świadczy ono o Jego dogłębnym rozeznaniu w obszarze nowoczesnych zagadnień oświetleniowych, jak i szeroko pojętej energooszczędności w budownictwie.**

2.3. Pytania i uwagi szczegółowe

W niniejszym punkcie recenzji zostały sformułowane bardziej szczegółowe pytania i uwagi wg kolejności odpowiadającej poszczególnym rozdziałom.

Rozdział 2

Na stronie 15 Kandydat napisał: „... możemy określić efektywność energetyczną obiektu jako sprawność energetyczną.”. Sformułowanie to jest niefortunne, bowiem różnica pomiędzy sprawnością a efektywnością jest podstawowa, wynika z praw fizyki, a pojęcie sprawności jest podstawowe dla praw termodynamiki.

Punkt 2.2.1

1. W punkcie tym nie zdefiniowano w sposób wystarczający lub nie podano odpowiednich oznaczeń (zgodnie z obowiązującą nomenklaturą) dla niektórych parametrów, proszę o wyjaśnienie znaczenia następujących: parametry katowe: ω , γ , α (co to znaczy kąt horyzontalny?). W równaniu (2.12) jest błąd, bowiem kąt γ powinien zmieniać się od 0^0 do 360^0 , a nie do 260^0 . Poza tym na stronie 55 Kandydat nazywa kąt γ kątem azymutalnym, a jednocześnie w innym miejscu kątem horyzontalnym, czyli jaka nazwa powinna być stosowana i jak te kąty są definiowane? Co oznacza sformułowanie: „poziome natężenie oświetlenia od światła dziennego”?
2. Jak nazywa się: „parametr określający zdolność odbijania światła przez daną powierzchnię”? Nie jest to ani współczynnik odbicia światła, ani Albedo jak napisał Kandydat.

Punkt 2.2.4

3. Proszę wyjaśnić zdanie: „Promieniowanie słoneczne to rodzaj fali

elektromagnetycznej o zakresie długości fal od $10^4 \mu\text{m}$, (promieniowanie rentgenowskie i gamma) do 10^5m (fale radiowe)” ???

4. Co oznaczają symbole: r w równaniu (2.14), ω w równaniu (2.15) i ρ w równaniu (2.16)?

Punkt 2.2.6

5. Co oznaczają poszczególne wielkości kątowe na rys. 2.3? Różnią się one od tych na rys. 2.2.

Rozdział 5

Na stronie 87 Kandydat po raz kolejny używa pojęcia *współczynnika odbicia światła*, który zgodnie z opisem w tekście pracy takim współczynnikiem nie jest. Należy tu więc powtórzyć pytanie (nr 2) zadane wcześniej do zapisów w rozdziale 2, punkt 2.2.

W odniesieniu do Tabeli 5.1 nasuwa się pytanie:

6. Jakie jest źródło danych dotyczących średniego natężenia promieniowania słonecznego, czy są to dane eksperymentalne, czy literaturowe? Jakiego usytuowania powierzchni one dotyczą?

Punkt 5.4

Analizując rysunki 5.15 i 5.16 przedstawiające charakterystyki rozkładu natężenia oświetlenia w funkcji głębokości pomieszczenia nasuwa się pytanie:

7. Dlaczego w pomieszczeniu od strony południowej w najbliższej odległości od okna wielkość natężenia oświetlenia jest mniejsza niż w pomieszczeniu od strony północnej?

Z kolei analizując rys. 5.18 – 5.19 można zauważyć, że odpowiednie rozkłady natężenia oświetlenia pomieszczenia od strony południowej, chociaż opisane są różnymi funkcjami (różne warunki napromieniowania słonecznego), mają taki sam przebieg.

8. Proszę wyjaśnić dlaczego przebiegi krzywych rozkładu natężenia oświetlenia pomieszczenia południowego na rys. 5.18 i 5.19 są praktycznie takie same?

Kolejne rysunki nasuwają również dalsze szczegółowe pytania co do przebiegu krzywych oświetlenia.

9. Dlaczego na rys. 5.20 przy odległości 3 metrów od okna następuje przecięcie krzywych rozkładu natężenia oświetlenia?
10. Dlaczego wartości natężenia światła w niewielkiej odległości od okna w maju są prawie dwukrotnie większe niż w czerwcu wg rysunków 5.25 i 5.26? Przebieg średnich rozkładów natężenia światła dziennego w sali od strony południowej również wskazuje, na o wiele wyższe, w tym przypadku blisko trzykrotnie wyższe wartości natężenia światła blisko okna w miesiącu maju niż w czerwcu, a także około 1/3 wyższe w porównaniu z lipcem. Proszę wytłumaczyć to zjawisko.

Rozdział 6

Analizując zamieszczone informacje można zauważyć, pewną nieścisłość w Tabeli 6.1, stąd pytanie:

11. Czy w Tabeli 6.1 okres II jest dobrze opisany?

Z kolei w punkcie 6.5 Kandydat opisuje oszczędności w zużyciu energii i kosztach użytkowania obiektu szkolnego przy zastosowaniu opracowanego przez siebie systemu sterowania oświetleniem. Przyjmując graniczne minimalne wartości natężenia oświetlenia

w pomieszczeniach układ sterowania może odpowiednio włączać lub wyłączać oświetlenie. Kandydat pisze, iż można ustalić *wartości kryterialne natężenia światła, dla których powinny być załączane i wyłączane poszczególne rzędy lamp oświetleniowych*. W tym miejscu można zauważyć, iż w tym przypadku Kandydat odnosi się do konkretnych wartości, które można nazwać granicznymi, a nie *kryterialnymi*. To zależność matematyczna może być kryterialna, ale nie liczba.

W tekście występują pewne błędy związane z nazewnictwem, niektóre z nich zostały wyszczególnione w tej recenzji. W pracy występują również drobne błędy redakcyjne, w tym interpunkcyjne.

2.4. Podsumowanie

Podsumowując należy stwierdzić, iż **recenzowana rozprawa dokumentuje wszechstronną wiedzę oraz bardzo duży wkład pracy, jaką włożył pan mgr inż. Sławomir Sowa w zorganizowanie i przeprowadzenie badań podstawowych, rozbudowanych badań eksperymentalnych, opracowanie modeli sterowania działaniem układów oświetlenia światłem sztucznym, następnie w walidację opracowanych modelowych rozkładów natężenia światła dziennego i działanie algorytmów sterowania oświetleniem w warunkach rzeczywistych, a ostatecznie w analizę wyników mających istotne walory poznawczo - aplikacyjne**. Rozprawa dokumentuje istotne oryginalne osiągnięcie naukowe Kandydata, a zamieszczone uwagi i pytania wynikają przede wszystkim z pokazania możliwości dopracowania pewnych niezbyt jasnych sformułowań i poprawy prezentacji wyników, zwłaszcza tych w postaci graficznej.

Wyrażam opinię, że w świetle rozpoznanego przez Kandydata stanu wiedzy, decyzja o napisaniu niniejszej rozprawy i przeprowadzeniu badań była przemyślana i słuszna, główna teza pracy została udowodniona, a postawiony cel rozprawy został osiągnięty.

3. Wniosek Końcowy

Rozprawa doktorska pana mgr inż. Sławomira Sowy wnosi widoczny wkład w rozwój nauk technicznych, w badania z zakresu energetyki i inżynierii środowiska, w tym zagadnienia wykorzystania oświetlenia światłem dziennym na rzecz zmniejszenia zużycia energii w budynkach. Przeprowadzone badania wchodzą poza tym w obszar elektrotechniki, automatyki i budownictwa. Interdyscyplinarność nowoczesnych zagadnień naukowo-badawczych charakteryzuje coraz więcej współczesnych badań. Tematyka rozprawy zawiera się w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Wartość merytoryczna rozprawy i oryginalne osiągnięcia Kandydata spełniają wymagania wymienione w przepisach Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018r. (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668) z późniejszymi zmianami, tj. Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 10 marca 2023 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz. U. 2023 poz. 742, szczególnie Dział V Stopnie i tytuł w systemie szkolnictwa wyższego i nauki, Rozdział 2 Stopień doktora, Oddział 1 Nadawanie stopnia doktora, Art.187, i wobec powyższego wnoszę do Wysokiej Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo, Energetyka Politechniki Poznańskiej o przyjęcie rozprawy doktorskiej pt. „Poprawa efektywności energetycznej instalacji oświetleniowych w obiektach użyteczności publicznej” pana mgr inż. Sławomira Sowy do dalszego etapu w postępowaniu o nadanie stopnia doktora nauk technicznych.

