

Łódź, 17.03.2021 r.

Dr hab. inż. Jacek Kabziński, prof. PŁ
Instytut Automatyki Politechniki Łódzkiej
ul. Stefanowskiego 18/22
90-924 Łódź

S E K R E T A R I A T
Rady Dyscypliny AEE

Wpłynęło dnia23.03.2021.....
Zarejestrowano pod nr
Podpis*jm*.....

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Mirosława Dechnika

pt. „Analiza możliwości poprawy efektywności energetycznej, w kontekście adaptacji oświetlenia pomieszczeń w budynku biurowym poprzez personalizację warunków oświetlenia”

opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

1. Postać rozprawy i forma przedstawionych wyników

Rozprawa doktorska przedstawiona do oceny liczy 198 stron, zawiera polskie i angielskie streszczenie, sześć rozdziałów, literaturę, spis tabel i rysunków, dodatek prezentujący kwestionariusze przeprowadzonych badań ankietowych, wytworzone oprogramowanie i parametry opracowanych modeli. Rozprawa jest napisana po polsku. Spis literatury jest bardzo bogaty - zawiera 391 pozycji, umieszczonych w zasadzie w kolejności cytowania, i w większości są one faktycznie cytowane w tekście rozprawy. Ta obszerność i niezbyt fortunny układ bibliografii nieco utrudniają jej analizę, a stosowanie kilku odwołań do uzasadnienia pojedynczego zdania czy myśli niewątpliwie świadczy o erudycji Autora, ale może też sugerować ich zdawkowość.

Profil ORCID autora, zawierający na dzień pisania recenzji 24 pozycje, dowodzi, że tematyką rozprawy para się on od jakiegoś czasu (np. Efektywność energetyczna sterowania oświetleniem wewnątrz, Napędy i Sterowanie, 2017-12), ale nie zidentyfikowałem publikacji odnoszących się do zasadniczych wyników rozprawy.

Praca wyróżnia się niezwykle starannością redakcji. Język jest niemalże perfekcyjny, a jednocześnie jasny i komunikatywny. Usterek i literówek praktycznie nie ma. Wzorów i wyprowadzeń jest bardzo mało, więc i nie ma w nich pomyłek. Jedyną niedoskonałością, którą zauważyłem jest stosowanie znaku \times do oznaczenia każdego mnożenia, niezależnie od jego rodzaju. Konfundujące jest też rozdzielanie liczb w ciągu przecinkami bez dodatkowego

odstępu (np. wzór 7), nie wiadomo wtedy czy przecinek jest separatorem dziesiętnym, czy rozdziela dwie liczby. Wykresy i rysunki są dobrej jakości, właściwie dobrane i dobrze opisane.

2. Ocena tematyki rozprawy i zastosowanych metod badawczych

Przedmiotem badań przedstawionych w rozprawie jest regulacja oświetlenia w pomieszczeniach biurowych typu open-space. Celem tej regulacji jest zapewnienie odczucia komfortu osobistego użytkowników (realizowanego na kilku płaszczyznach) i minimalizacja zużycia koniecznej do tego energii. Autor ujmuje to zagadnienie w dość skomplikowanej tezie rozprawy:

„Możliwa jest poprawa efektywności energetycznej pracy instalacji oświetleniowej, poprzez adaptację oświetlenia pomieszczeń w budynku biurowym typu smart, do realizacji nadrzędnej funkcji sterowania mającej na celu wytworzenie spersonalizowanych warunków oświetlenia dostosowanych do potrzeb poszczególnych użytkowników.

Obniżenie zużycia energii będzie następstwem nie tylko

zróżnicowania warunków oświetleniowych w na skutek sterowania,

ale także akceptacji użytkowników dla podejmowanych automatycznie decyzji.”

Tak postawiona teza rozprawy implikuje jej (w pewnym stopniu) interdyscyplinarny charakter i konieczność zastosowania bardzo różnorodnych narzędzi badań. W jej obszarze mieści się bowiem ocena jakości oświetlenia, ocena satysfakcji użytkownika, propozycja układu sterowania oświetleniem uwzględniającego preferencje i aktywność wielu użytkowników. Autor radzi sobie z tą interdyscyplinarnością problemu stosując np. badania ankietowe do subiektywnej oceny komfortu świetlnego, stosowne narzędzia do modelowania rozkładu oświetlenia w pomieszczeniu o wielu źródłach światła, narzędzia optymalizacji do realizacji głównej części algorytmu sterowania oraz odnosi się do możliwości implementacji proponowanego rozwiązania w konkretnej technologii. Choćby z tego wyliczenia stosowanych metod badawczych widać, że główny ciężar opisanych badań i wyników spoczywa w obszarze dawnej dyscypliny Elektrotechnika, w której był otwarty przewód, a doskonale mieści się w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika, w której będzie zamykany.

Sam problem zmniejszenia zużycia energii przy jednoczesnym zachowaniu poczucia komfortu użytkowników jest niezwykle istotny z punktu widzenia najbardziej żywotnych celów jednostki i społeczeństwa. Dobrze, że powstają prace, które próbują aplikować techniki sterowania i modelowania do tak elementarnych i bliskich człowiekowi zastosowań. Właśnie

to „systemowe” podejście do problemu przekonuje mnie o jego dobrym postawieniu i umiejscawia recenzowaną pracę w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika.

3. Charakterystyka rozprawy i ocena uzyskanych wyników

Pierwsze trzy rozdziały pracy mają w zasadzie charakter wstępny. Są bardzo obszerne, zajmują ponad połowę pracy i służą do opisowego uzasadnienia wyboru tematu, zastosowanego rodzaju oświetlenia i sposobu dojścia do rozwiązania, które jest głównym wynikiem pracy. Można tu przeczytać np. o światłoczułych komórkach zwojowych siatkówki, procentowych zależnościach zużycia energii w poszczególnych segmentach gospodarki, historii budowy inteligentnych budynków itp., itd. To niewątpliwe świadectwo dużej erudycji autora, czasem jednak ta obfitość tematów i informacji wydawała mi się nadmiarowa, w stosunku do głównego wyniku pracy, w którym ograniczono się do sterowania intensywnością źródeł światła.

W rozdziale drugim przykuwa uwagę bardzo szczegółowe zestawienie dotychczas opisanych rozwiązań automatycznego sterowania oświetleniem (strony 60-79). Autor opisuje liczne systemy sterowania w funkcji zajętości stanowisk pracy i w funkcji dostępnego światła dziennego, ale nie podaje przykładów uwzględnienia aktywnej regulacji preferowanych poziomów oświetlenia przez użytkowników. Jeśli tak faktycznie jest, to podkreśla to oryginalność i znaczenie podejścia przyjętego w rozprawie. Istotnym punktem rozdziału jest decyzja o ograniczeniu się do ledowych źródeł światła i rekomendacja standardu DALI do implementacji sterowania.

Rozdział 3 poświęcono na potwierdzenie założenia, że udostępnienie użytkownikom możliwości indywidualnej regulacji poziomu oświetlenia zapewni dodatkowe oszczędności energii i przyczyni się do poprawy samopoczucia w miejscu pracy. Autor opracował kwestionariusz i przeprowadził ankietę wśród 239 osób oceniających warunki w pomieszczeniu Małopolskiego Laboratorium Budownictwa Energooszczednego. Z faktu, że ok 20% ankietowanych uznało oświetlenie za zbyt jasne, a tylko kilka procent za zbyt ciemne ma wynikać sensowność przyjętych założeń. Ankieta obejmowała wiele innych aspektów ergonomii oświetlenia (np. 27% badanych skarżyło się na jaskrawe odbicia światła na elementach pomieszczenia, a 20% na zniekształcenie barw) i może szkoda, że nie odniesiono się do nich w ocenie uzyskanego rozwiązania.

Główne wyniki pracy przedstawiono w rozdziale 4. Pomieszczenie zostało najpierw zamodelowane przy pomocy oprogramowania DIALux, do którego wprowadzono wymiary, współczynniki odbicia i przepuszczania światła dla poszczególnych powierzchni (ścian, wyposażenia itp.). Model sprawdzono przez porównanie wyliczeń z pomiarami natężenia oświetlenia w rzeczywistym pomieszczeniu. Nie uwzględniano przenikania światła dziennego.

Pomiary wykonano przy „najwyższej nastawie lamp”. Różnice między danymi empirycznymi, a natężeniami wyliczonymi z modelu sięgają 15% (na krańcach pomieszczenia). Autor nie pisze jaka jest zgodność modelu w innych warunkach oświetlenia, np. przy ściemnieniu poszczególnych czy wszystkich lamp. Od tego momentu model w systemie DIALux zastąpi Autorowi rzeczywiste pomieszczenie. Czas obliczeń modelu dla jednej kombinacji współczynników ściemnienia lamp jest tak długi, że uniemożliwia używanie tego modelu w czasie rzeczywistym.

Dalej, autor zaproponował matematyczny model oświetlenia w pomieszczeniu doświadczalnym, którego wejściami są współczynniki ściemnienia ledowych źródeł światła, (28) zebrane w wektorze d , a wyjściami natężenia oświetlenia na 17 stanowiskach pracy zebrane w wektorze l . Większy współczynnik ściemnienia oznacza (może nieco wbrew nazwie) większy strumień świetlny lampy i większy pobór mocy.

Na rysunku 5.8 Autor przedstawia model dynamiczny, uwzględniający inercję w zależności strumienia lampy od współczynnika ściemnienia, jednak dalej ogranicza się do zależności statycznej, obowiązującej w stanach ustalonych (przyjmując dodatkowo liniową zależność strumienia świetlnego lampy od współczynnika ściemnienia). W pierwszym zaproponowanym modelu zależność między d a l jest liniowa – Autor zakłada, że natężenie oświetlenia na stanowisku pracy jest liniową kombinacją współczynników ściemnienia poszczególnych lamp. Współczynnik tej kombinacji mogą być wyznaczone empirycznie – przez pomiar natężenia oświetlenia na stanowiskach przy zapalanej jednej lampie, ale Autor wyznacza je z modelu w systemie DIALux, choć nie weryfikował go w innych warunkach oświetlenia niż „najwyższe nastawy lamp”. Autor przeprowadził w tym celu 28 obliczeń modelu DIALux, jak rozumiem przy jednej włączonej lampie każda, a wyznaczone w każdej z nich 17 natężeń oświetlenia na stanowiskach pracy pozwoliło obliczyć współczynniki modelu. Na tym etapie Autor nie komentuje dokładności otrzymanego modelu przy różnych konfiguracjach współczynników ściemnienia, nie weryfikuje słuszności hipotezy o liniowości zależności l od d .

Tym niemniej coś (nie znajdujemy w pracy wyjaśnienia poza zdaniem „Wybór nieliniowego operatora wynikał z występowania nieliniowości w rozważanym zagadnieniu”) skłoniło Autora do zaproponowania drugiego modelu, nieliniowego, w postaci sztucznej sieci neuronowej o jednej warstwie ukrytej o 19 neuronach (liczbę neuronów wybrano „doświadczalnie” z zakresu 2-40), których funkcja aktywacji jest tangens hiperboliczny. Sieć skonstruowano i nauczono w Matlabie, na podstawie 130 par (d, l) wygenerowanych jak można się domyślać w modelu DIALux i podzielonych na zbiór uczący, walidacyjny i testujący. Jaki

jest rozkład tych danych w 28-wymiarowej przestrzeni d nie wiadomo. W każdym razie uczenie sieci przebiegało w typowy sposób i było zbieżne. Autor podejmuje próbę oceny dokładności uzyskanego modelu posługując się jednak oceną statystyczną – pokazuje liniową regresję między danymi wzorcowymi i wyjściem sieci oraz histogram błędu średniego natężeń oświetlenia. O wiele bardziej przekonujące byłoby pokazanie maksymalnych różnic w natężeniach oświetlenia na stanowiskach obliczonych przez sieć i przez DIALux dla różnych kombinacji współczynników ściemnienia.

W końcu zostaje sformułowane i rozwiązane zadanie minimalizacji mocy przy ograniczeniach w postaci zadanych natężeń oświetlenia stanowisk. Jako że moc oświetlenia jest proporcjonalna do sumy współczynników ściemnienia zadanie polega na minimalizacji tej sumy przy ograniczeniu polegającym na tym, że natężenia oświetlenia stanowisk wyliczone z modelu matematycznego są nie mniejsze od zadanych przez użytkowników, a w przypadku nieobsadzonego stanowiska od przyjętej wartości minimalnej. W przypadku modelu liniowego jest to zadanie programowania liniowego i Autor rozwiązuje je funkcją linprog Matlaba, w przypadku nieliniowego modelu stosuje funkcję fmincon z domyślnym algorytmem punktu wewnętrznego. W żadnym z przypadków Autor nie bada kwestii istnienia rozwiązania, czy wypukłości problemu, widocznie nie napotkał na trudności w rozwiązaniu tak postawionego zadania optymalizacji.

Efekty optymalizacji można ocenić na rysunkach 68 i 69 gdzie pokazano uzyskane natężenia oświetlenia dla różnej liczby zajętych stanowisk. Średnie różnice między uzyskanym a pożądanym natężeniem na zajętych stanowiskach wahają się od 40 do 2% (w zależności od liczby obsadzonych stanowisk), ale w poszczególnych przypadkach wytworzone natężenie oświetlenia może być nawet kilkukrotnie większe od pożądanego (np. stanowiska 1,6,7 na rys 68d). Uzyskane oszczędności energii wynoszą od 12 do 65% w zależności od liczby obsadzonych stanowisk (rysunek 71 uzyskany z pomiarów w pomieszczeniu doświadczalnym). Generalnie wybór liniowego lub nieliniowego modelu matematycznego do optymalizacji wydaje się nie mieć większego znaczenia.

Na stronie 137 przedstawiono krótki opis implementacji proponowanego rozwiązania w systemie sterowania oświetleniem w standardzie DALI. Jakkolwiek jest to bardzo skrótowy opis, to ważne, że Autor podjął próbę implementacji i dokonał pomiarów zużycia energii w rzeczywistym obiekcie.

W rozdziale 5 Autor zbiera doświadczenia zdobyte przy pisaniu rozprawy w formie „wytycznych” przeznaczonych dla przyszłego projektanta proponowanej instalacji w rzeczywistym budynku biurowym.

Rozdział 6 to obszerne podsumowanie/streszczenie pracy jeszcze raz uwypuklające jej najważniejsze elementy.

4. Uwagi, dyskusja wyników

Uprzejmie proszę Autora o odniesienie się do poniższych kwestii:

1. Czy można zweryfikować poprawność modelu DIALux dla innych warunków oświetlenia niż „najwyższe nastawy lamp”?
2. Poproszę o pokazanie największych rozbieżności między w modelem DIALux, modelem liniowym i modelem nieliniowym dla wybranych kombinacji współczynników ściemnienia (np. co druga lampa włączona, ściemnione do połowy lampy nad wybranymi stanowiskami itp.) i skomentowanie wyników.
3. Jak wygenerowano dane uczące dla sieci, jaka jest zależność błędu modelu od liczby wygenerowanych danych uczących?
4. Jak powstał rysunek 63, skąd liczba danych na osi rzędnych?
5. Poproszę, mimo wszystko, o zajęcie stanowiska i rekomendowanie jednego z modeli liniowy/nieliniowy, lub o próbę określenia warunków w których należy wybrać jeden z nich.
6. Poproszę o rozważenie zadania optymalizacji z dwustronnymi ograniczeniami, np. typu $0,9*(\text{natężenia preferowane}) < (\text{natężenia wyliczone}) < 1,2*(\text{natężenia preferowane})$
Czy dla takiego zadania istnieje rozwiązanie? Jakie będą różnice w wynikach.
7. Czy jest możliwe, żeby system ostrzegał użytkownika, że żąda on nierealizowalnego (w aktualnych warunkach) preferowanego natężenia i dawał mu możliwość zmiany dyspozycji?
8. Po każdej zmianie preferowanych natężeń oświetlenia konieczne jest rozwiązanie zadania optymalizacji. Czy faktycznie w każdym biurze należy postawić komputer z Matlabem dedykowany do tego zadania? Jak Autor wyobraża sobie masową realizację?
9. Czy uwzględnienie przenikania światła dziennego zmieni zasadniczo zastosowane modele, zadanie optymalizacji i wyniki pracy

5. Konkluzja

Ogólna ocena rozprawy i przedstawionego w niej toku dociekań naukowych jest pozytywna. Praca jest ciekawa i wartościowa, odnosi się do problemów bardzo aktualnych w sterowaniu i do istotnych zastosowań. Autor przedstawił jasną analizę problemu, podstawy teoretyczne, badania symulacyjne i przeprowadził pomiary na rzeczywistym obiekcie. Wykazał się przy tym

dużym zasobem wiedzy o interdyscyplinarnym charakterze, z dostatecznym komponentem wchodzącym w zakres dyscypliny AEE.

W pracy określono poprawnie zagadnienie naukowe, rozwiązano je samodzielnie, przy użyciu właściwych metod, uzyskano nowe wyniki merytoryczne. Zaproponowane podejście jest oryginalne, twórcze i dostatecznie proste by zapewnić możliwość implementacji. Autor udowodnił to uruchamiając prototyp system w rzeczywistym budynku.

Praca nie wymaga uzupełnień i wnosi wkład w rozwój dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika.

Rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i w świetle obowiązujących przepisów może być dopuszczona do publicznej obrony.



Jacek Kabziński

