

Modułowe oświetlenie skupione na człowieku jako element systemu automatyki budynkowej – budowa i zastosowanie

Filip Durlik , Katarzyna Bańczyk , Radosław Dziubacki, Dominik Latoń , Aleksander Skała , Jakub Grela 

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Kraków

Streszczenie: W pracy opisano ideę oświetlenia skupionego na człowieku (HCL, ang. *Human Centric Lighting*) oraz zastosowanie modułowego oświetlenia zgodnego z tą koncepcją, jako elementu systemu automatyki budynkowej. Omówiono proces projektowania i prototypowania opraw świetlnych, uwzględniając zaawansowane funkcje adaptujące oświetlenie do panujących w pomieszczeniu warunków i aktualnych potrzeb użytkowników. Prace wykazały potencjał ruchomych źródeł światła do precyzyjnego oświetlania określonych obszarów oraz znaczenie algorytmów sterowania dla pełnego wykorzystania tego potencjału.

Zaprezentowano trójwarstwową architekturę systemu (poziom obiektowy, sterowania lokalnego i nadrzędnego), umożliwiającą dopasowanie parametrów do preferencji użytkowników oraz optymalizację pracy według kryteriów, takich jak efektywność energetyczna. Praca zawiera podstawy teoretyczne, analizę literatury naukowej, proces budowy modułu od strony technicznej oraz wyniki badań fotometrycznych prototypów modułów.

Słowa kluczowe: oświetlenie skupione na człowieku, Internet Rzeczy, automatyka budynkowa, wielopoziomowe systemy sterowania

DESIGN AND APPLICATION OF HUMAN CENTRIC LIGHTING MODULES AS PART OF A BUILDING AUTOMATION SYSTEM

Abstract: The paper describes the concept of Human Centric Lighting (HCL, or Human Centric Lighting), and the application of modular lighting according to this concept as part of a building automation system. The process of designing and prototyping luminaires was discussed, taking into account advanced features that adapt the lighting to the ambient conditions in the room and the current needs of the users. The work demonstrated the potential of moving light sources to precisely illuminate specific areas and the importance of control algorithms to fully realize this potential.

A three-layer system architecture (object, local control and supervisory) was presented, allowing parameters to be adjusted according to user preferences and optimizing operation according to criteria such as energy efficiency. The theoretical foundations based on the analysis of scientific articles and the actual technical process of building the lighting module, as well as the results of photometric tests of module prototypes are presented in the paper.

Keywords: Human Centric Lighting, Internet of Things, building automation, multi-level control system

1. Wprowadzenie

Biologiczny zegar i naturalne reakcje organizmu związane z codzienną rutyną to tematy od lat będące przedmiotem badań naukowych zarówno w obszarze nauk biologicznych, jak i psychologii. Ciekawymi aspektami ściśle związanymi z tym zagadnieniem są wszystkie zewnętrzne czynniki wpływające na cykliczność funkcjonowania ludzkiego ciała na co dzień oraz procesy w nim zachodzące. Wartość tych mechanizmów i badań ich dotyczących została podkreślona w 2017 roku przez Norweski Komitet Noblowski, który przyznał Nagrodę Nobla w dziedzinie fizjologii i medycyny zespołowi opisującemu zasady cyklu okołodobowego na organizmie modelowym. Opis przygotowany w ramach pracy naukowej noblistów koncentrował się na genach i białkach kontrolujących dobowy rytm u muszek owocowych. W pracy podkreślano analogiczne zachowania również u innych organizmów, włączając w to ludzi (Nauka w Polsce n.d.).

Badania nad zegarem biologicznym człowieka coraz częściej potwierdzają wpływ światła na aspekty pozawzrokowe naszego funkcjonowania, co znacząco wpływa na projektowanie oświetlenia. Obserwacje potwierdziły, że ekspozycja na dynamicznie zmieniające się światło dzienne jest kluczowa dla prawidłowego funkcjonowania organizmu i jego zdrowego rozwoju (Petrinska i Nikolova 2023). Coraz częściej uwzględnia się nowo zdefiniowane biologiczne potrzeby użytkowników, co prowadzi do prób odwzorowania naturalnych warunków oświetleniowych również wewnątrz pomieszczeń. Cała koncepcja odpowiadająca tym działaniom została nazwana oświetleniem skoncentrowanym na człowieku lub w skrócie HCL (ang. *Human Centric Lighting*).

Oświetlenie skoncentrowane na człowieku – idea oświetlenia przyjaznego biologicznie

Koncepcja HCL obejmuje przede wszystkim dostosowywanie intensywności oświetlenia, jego temperatury barwowej oraz ich dynamiczne zmiany w czasie. Kolejnym istotnym zadaniem podejmowanym w ramach HCL jest personalizacja oświetlenia zgodnie z preferencjami użytkownika, wynikającymi między innymi z wieku, płci, rodzaju wykonywanej pracy, historii ekspozycji na światło, a nawet naturalnych preferencji i adaptacji wynikających z lokalizacji geograficznej. Wszystkie te czynniki podlegają dalszym badaniom laboratoryjnym i środowiskowym, których celem jest sprecyzowanie i ustalenie bezpośredniego wpływu poszczególnych konfiguracji na stan psychofizyczny człowieka, efektywność jego pracy i możliwości wydłużenia czasu skupienia (Wantuch i Durlik 2023).

Postęp technologiczny w dziedzinie techniki oświetleniowej dostarczył projektantom i użytkownikom narzędzi, jakimi są diody elektroluminescencyjne (LED). Ich wynalezienie i powszechne stosowanie stanowiło istotny przełom w dziedzinie sztucznego

oświetlenia. Parametry optyczne diod LED i sposób, w jaki można nimi sterować, umożliwiają realizację założeń koncepcji HCL w praktyce. Dynamiczna regulacja parametrów, takich jak temperatura barwowa i natężenie strumienia świetlnego, pozwala na niemalże perfekcyjne odwzorowanie zmian oświetlenia naturalnego. Jednakże koncepcja ta stawia w centrum człowieka, dlatego istotne jest badanie reakcji organizmu na zmiany warunków oświetleniowych i wykorzystanie uzyskanych odczytów do tworzenia algorytmów automatycznego sterowania oświetleniem. Do tego celu wykorzystuje się czujniki parametrów życiowych sprzężone z technologią Internetu Rzeczy (IoT).

Rosnąca złożoność aplikacji oświetleniowych rozwijanych zgodnie z koncepcją HCL, podobnie jak wiele procesów technologicznych, polega na ciągłej analizie ogromnych ilości danych przez wyspecjalizowane systemy komputerowe, a nawet na implementacji samouczącego się oprogramowania oraz sztucznej inteligencji.

Równie kluczowa jak systemy realizujące sterowanie i obsługujące skomplikowane algorytmy jest strona sprzętowa opraw i modułów oświetleniowych, dzięki którym możliwe jest dostarczanie światła. Element wykonawczy nie powinien być przy tym ograniczeniem, a raczej częścią urządzenia, która rozszerza możliwości tworzonych instalacji, dając projektantom i instalatorom swobodę realizacji często skomplikowanych i złożonych scen oświetleniowych w sposób wspierający użytkowników.

Za cel projektu badawczego obrano zaprojektowanie oraz wykonanie modułu oświetleniowego, który poza łatwością instalacji i konfiguracji oferować będzie mechanizmy umożliwiające realizację algorytmów wspomagających naturalny cykl dobowy człowieka. Założono również rozszerzenie możliwości modułu, poza samą regulacją parametrów oświetlenia, o rozwiązania umożliwiające jak najszersze wykorzystanie naturalnego światła słonecznego docierającego do pomieszczeń przez okna. Wskutek rozważań nad istniejącymi na rynku rozwiązaniami oraz możliwościami, jakich dostarczają systemy sterowania automatyką budynkową, zdecydowano się rozwinąć projekt o mechanikę realizującą ruch źródła światła. Tym sposobem poza zadawaniem nastaw natężenia i barwy światła możliwe jest skierowanie strumienia w obszar pomieszczenia, w którym jest go mniej ze względu na kąt padania promieni słonecznych lub większą odległość od okien.

2. Aktualny stan wiedzy

W literaturze naukowej temat *Human Centric Lighting* (HCL) jest szeroko omawiany i analizowany z różnych perspektyw. Światło, poza wpływem na wzrokowe odbieranie jego barwy i jasności przez człowieka, oddziałuje także na receptory pozawzrokowe, które znajdują się w ludzkim oku. Stymulacja tych receptorów ma wpływ na syntezę przez organizm melatoniny – hormonu odpowiadającego za regulację cyklu dobowego,

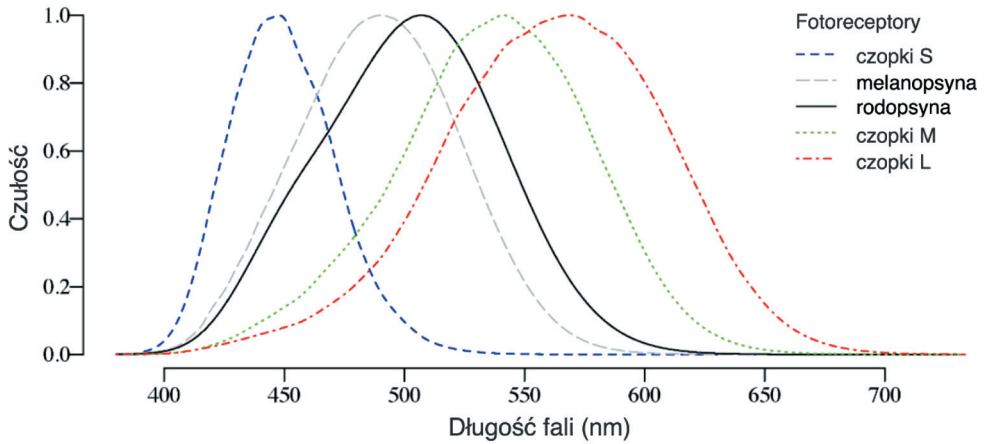
temperatury ciała i trybu działania, na jaki zorientowany jest organizm. Dostępne na rynku oprawy oświetleniowe najczęściej kontrolowane są przez uniwersalny protokół DALI-2, który proces rozjaśniania oraz przyciemniania opraw realizuje po nieliniowej krzywej dostosowanej do czułości ludzkiego oka (rys. 1).



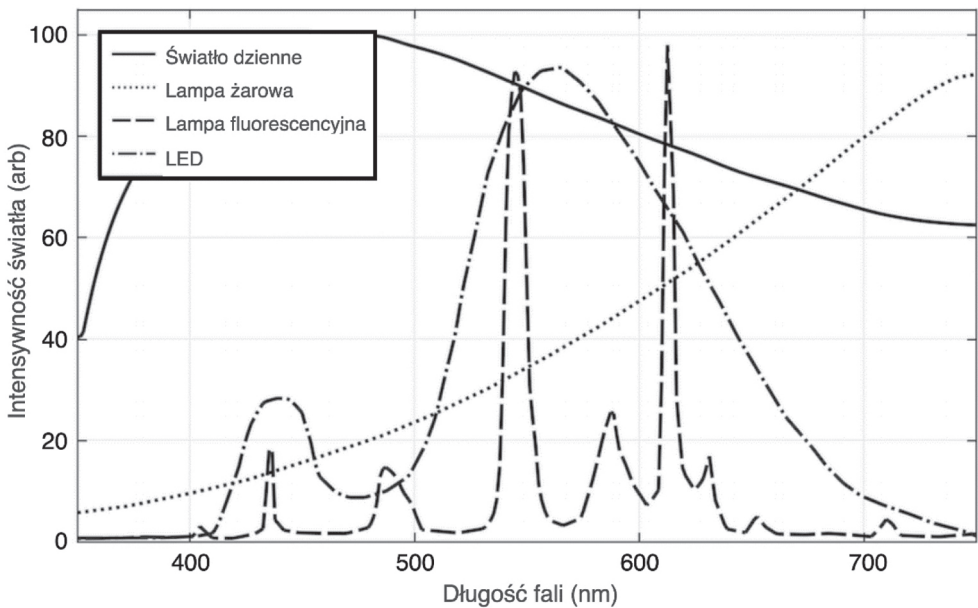
Rys. 1. Porównanie spektrum światła: a) klasyczny LED o ciepłej białej barwie; b) biały LED o zmodyfikowanej charakterystyce; c) światło słoneczne
Źródło: opracowanie własne na podstawie www.led-professional.com

Podstawowym wsparciem rozwoju technologii oświetleniowej oraz samej idei oświetlenia skupionego na człowieku są prowadzone na całym świecie badania naukowe tych obszarów, które właściwie każdego roku wnoszą coś nowego do stanu wiedzy. Od strony inżynierskiej i biologicznej HCL w postaci, która znana jest aktualnie, wywodzi się z przełomowego odkrycia dodatkowego, piątego typu receptorów w oku człowieka, a właściwie wszystkich ssaków. W odróżnieniu od receptorów wzrokowych, czyli pręcików – odpowiadających za widzenie kolorów i czopków, dzięki którym możliwe jest widzenie w słabych warunkach oświetleniowych, receptory ipRGC odpowiadają za zjawiska pozawzrokowe. Receptory te zwane są melanopsynowymi i nie są w ogóle zaangażowane w tworzenie obrazów wizualnych. Istnienie receptorów ipRGC odkryto w 2000 roku podczas badania wpływu światła na cykl dobowy myszy, których organizmy nie wytworzyły pozostałych receptorów (Hankins i in. 2008). Ich czułość na poszczególne długości fali elektromagnetycznych nie pokrywa się z żadnym rodzajem receptorów wizualnych (rys. 2). Badania ujawniały bezpośredni wpływ melanopsyny na mechanizm rozszerzania i zwięzania źrenic oraz co ważniejsze dla HCL – hamowanie syntezy melatoniny w szyszynce (Petrsinska i Nikolova 2023).

Analiza charakterystyki popularnych typów źródeł światła (rys. 3) pozwoliła na zauważenie poważnych braków w emisji fali o długości, na którą badane receptory są najczulsze (490 nm). Rozwój techniki i tym samym technologii wytwarzania diod LED dał producentom narzędzia umożliwiające formowanie spektrum świecenia w celu jeszcze lepszego naśladowania naturalnego światła słonecznego. Możliwe jest to na przykład przez oparcie emisji światła na fioletowych (410 nm) chipach w miejsce stosowanych dotychczas niebieskich (450 nm), a następnie pokrycie fosforem wywołującym rozsyłanie światła o szerokim spektrum (Wantuch i Durlik 2023).



Rys. 2. Czułość poszczególnych typów receptorów na światło o różnej długości fali
Źródło: opracowanie własne na podstawie Conus i Geiser (2020)



Rys. 3. Porównanie spektrum popularnych źródeł światła
Źródło: opracowanie własne na podstawie *Calculating the Emission Spectra from Common Light Sources*

W wielu pracach badawczych naukowcy skupiają swoją uwagę na aspekcie wpływu HCL na zdrowie. W artykule Blume'a i in. (2019) autorzy podkreślają znaczenie światła w synchronizacji rytmów dobowych człowieka, które wpływają na cykle snu i czuwania oraz inne procesy biologiczne. Autor opisuje, jak rytmiczne zmiany, w oświetleniu

środowiskowym, wpływają na zachowania, takie jak odpoczynek podczas snu i aktywność podczas czuwania oraz ich biologiczne podstawy. Zwraca także uwagę na znaczący wpływ sztucznego światła, zwłaszcza wieczorami, na zakłócanie rytmów dobowych i snu, co może prowadzić do zaburzeń snu i czuwania. Również w publikacji Browna i in. (2022) autorzy podają wytyczne dotyczące optymalnego doboru światła w ciągu dnia, wieczorem i w nocy, aby wspierać fizjologię, sen i czujność. Skupili się oni na analizie wrażliwości ludzkich reakcji cyrkadianych, neuroendokrynnych oraz alarmowych na światło, które są wyrażone w ilości melanopowego równoważnika światła dziennego. Podobne badania są prowadzone już od wielu lat – przykładem tego jest artykuł (Wever i in. 1983), który opublikowany został już w latach 80. ubiegłego wieku. Przeprowadzone w nim eksperymenty wykazały, że wyższa intensywność światła (powyżej 4000 luksów), która hamuje wydzielanie melatoniny, może skuteczniej synchronizować ludzkie rytmy dobowe, wydłużając górną granicę synchronizacji do ponad 29 godzin.

Kluczową konkluzją, wynikającą z tych publikacji, jest informacja, że światło może być skuteczną, nieinwazyjną opcją terapeutyczną poprawiającą sen, nastrój i ogólne samopoczucie. Jednak rola oświetlenia nie kończy się na wspomaganiu samopoczucia, ma ono bowiem także działanie terapeutyczne. Przykładem są badania prowadzone na pacjentach z chorobą Alzheimera (Campbell i in. 1988). Ze względu na swoją specyfikę i często występujące zakłócanie rytmów okołodobowych choroba ta prowadzi do nieregularnych wzorców snu, nocnego wędrowania i zwiększonego niepokoju lub dezorientacji. Badania pokazały, że regularna ekspozycja na światło, szczególnie rano, może pomóc zresetować zegar okołodobowy i złagodzić te objawy. Terapia światłem o dużej intensywności wykazała poprawę jakości i czasu trwania snu, zredukowanie objawów depresji oraz zmniejszenie agitacji u pacjentów z chorobą Alzheimera.

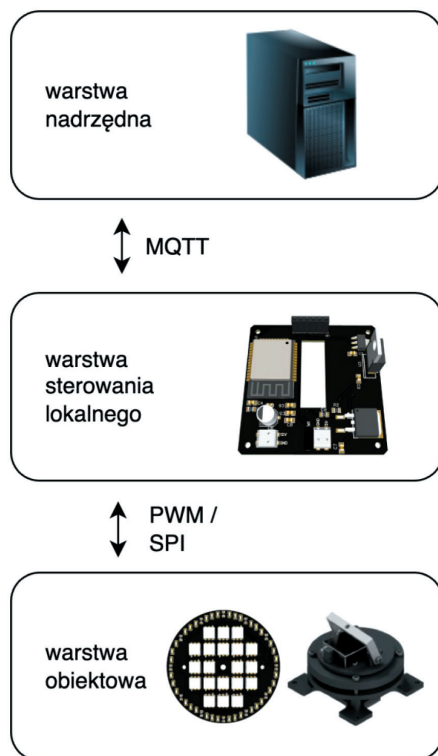
Prowadzone badania pozwalają zrozumieć, jak ważnym elementem jest właściwe oświetlenie i na ile aspektów w życiu wpływa. Jednak w celu poprawnej aplikacji oświetlenia w budynkach pod uwagę należy wziąć wiele parametrów i uwzględnić profil użytkownika w projekcie. W artykule (Jalali i in. 2024) autorzy oprócz badania wpływu oświetlenia na człowieka podjęli także temat rzeczywistego stosowania i implementacji idei HCL w codziennym życiu. Badanie to wypełnia lukę między naukowym zrozumieniem a praktyczną implementacją. Artykuł podkreśla również wyzwania związane z wdrażaniem HCL, takie jak konieczność precyzyjnych systemów sterowania oraz współpracy między różnymi interesariuszami. Zastosowania HCL obejmują różne środowiska, w tym biura, placówki zdrowotne, szkoły i domy mieszkalne, gdzie odpowiednie oświetlenie może poprawić nastrój, jakość snu oraz ogólny dobrostan użytkowników.

Opisywana w artykułach i badaniach rola oświetlenia i jego wpływ na poprawne funkcjonowanie zarówno jednostki, jak i społeczeństwa są kluczowe dla zapewnienia zdrowia i dobrego samopoczucia. Jednak zastosowanie standardowo dostępnych rozwiązań na rynku w większości przypadków nie pozwala na spersonalizowane tworzenie instalacji

oświetleniowej, która pod względem barwy, jasności, ale także padania wiązki świetlnej umożliwiłaby dostosowanie warunków do potrzeb jednostki. Jest to więc segment rynku charakteryzujący się niewykorzystanym potencjałem. Z tego względu wykonano moduły świetlne, które umożliwiają sterowanie tymi parametrami i spełniają ideę HCL.

3. Wykonanie modułu oświetleniowego

W wyniku prac zespołu opracowano moduł oświetleniowy dający możliwość realizacji funkcji oświetlenia skupionego na człowieku. Główną ideą projektu była jego funkcjonalność w kontekście zastosowania jako elementu zautomatyzowanej instalacji oświetleniowej sterowanej systemem automatyki budynkowej. Schematyczny obraz modelu instalacji, której główną częścią jest moduł oświetleniowy, został przedstawiony na rysunku 4. Moduł oświetleniowy jest częścią warstwy sterowania lokalnego, a także warstwy obiektowej. Funkcję warstwy nadrzędnej może pełnić główny sterownik systemu automatyki budynkowej, który umożliwi komunikację przy użyciu protokołu MQTT.

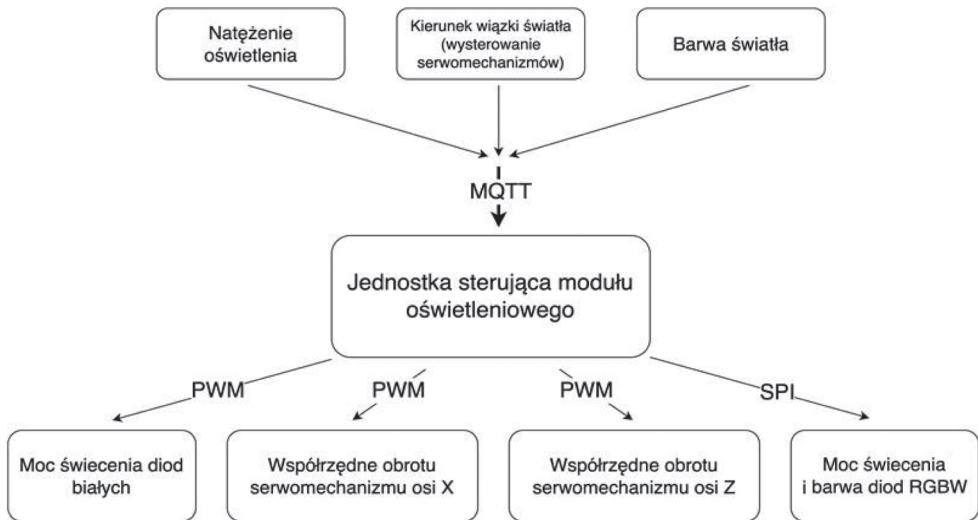


Rys. 4. Wielopoziomowa architektura systemu oświetleniowego z zaprojektowanym modułem

Schemat blokowy wykonanego urządzenia przedstawiono na rysunku 5. Moduł poprzez interfejs obsługujący protokół MQTT odbiera zadane przez jednostkę nadrzędną dane o docelowych parametrach światła oraz kierunku skupienia jego wiązki. Następnie za pomocą algorytmu zrealizowanego w układzie sterującym modułem przelicza te wartości na nastawy poszczególnych elementów wykonawczych, takich jak kąt obrotu serwomechanizmów czy barwa i natężenie światła diod LED.

Dzięki zastosowanym rozwiązaniom technicznym uzyskano następujące parametry i funkcje modułu:

- zakres regulacji barwy światła w przedziale około 2700–9000 K,
- regulacja natężenia z krokiem co 0,39%, w sumie 256 stanów,
- bezprzewodowa komunikacja przez Wi-Fi oraz protokół MQTT,
- kierowanie światła w określoną stronę podczas ruchu matrycy w dwóch osiach,
- możliwość łączenia modułów w oprawy (lampy).

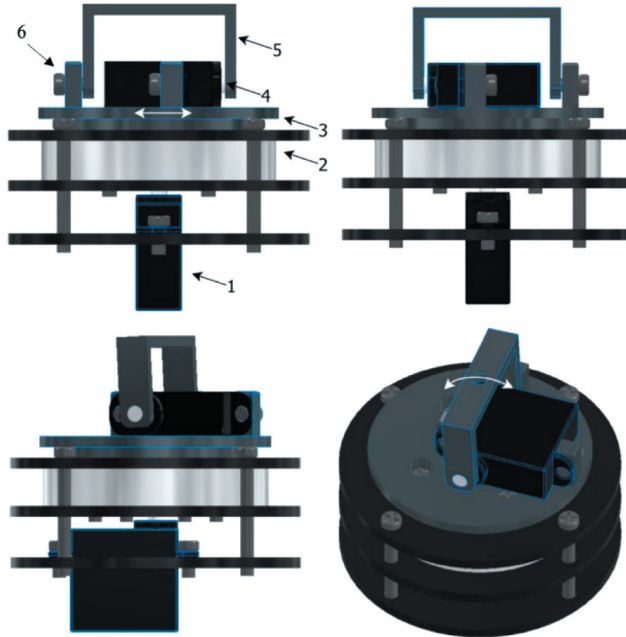


Rys. 5. Schemat blokowy działania modułu oświetleniowego

3.1. Budowa modułu

Moduł oświetleniowy złożony jest z trzech głównych części, którymi są układ napędowy, matryca LED oraz płytką z jednostką sterującą. Projekt układu napędowego wynikał z konstrukcji segmentu ruchomego, który umożliwia bezpieczne i kontrolowane sterowanie matrycą. Istotne było, aby umożliwić ruch matrycy wokół dwóch osi, co pozwala na jej wysterowanie w dowolnym kierunku. Wybór metody sterowania determinował niewielki rozmiar modułu świetlnego. Z tego względu zdecydowano się na zastosowanie serwomechanizmów o niewielkich rozmiarach, które umożliwiają stabil-

ny i kontrolowany ruch. W całej konstrukcji umieszczone zostały dwa serwomechanizmy sterujące ruchem obrotowym względem osi X oraz Z. Projekt segmentu mechanicznego (rys. 6) wykonano za pomocą oprogramowania Autodesk Inventor.



Rys. 6. Budowa segmentu mechanicznego

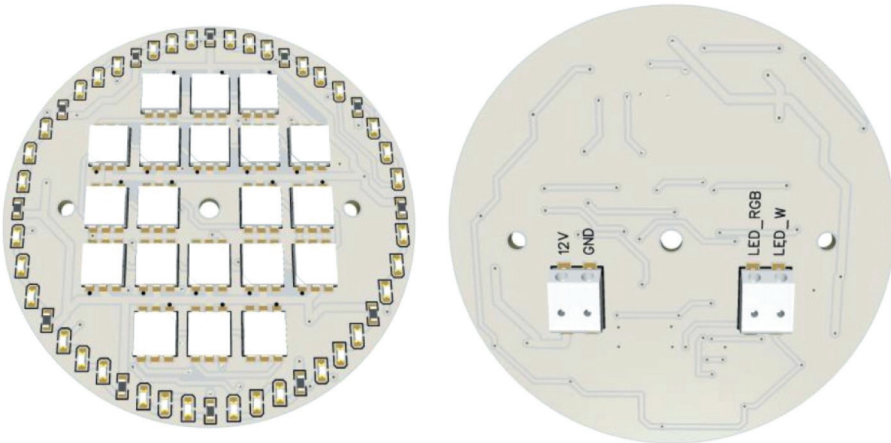
Poszczególne elementy konstrukcji oznaczono na pierwszym rzucie (widok z przodu):

1. serwomechanizm realizujący ruch obrotowy względem osi Z,
2. łożysko zmniejszające opory ruchu,
3. podstawa mocująca drugi serwomechanizm,
4. serwomechanizm realizujący ruch w osi X,
5. ramię utrzymujące matrycę LED,
6. łożysko kulkowe mocujące ramię.

W kolejnym etapie zaprojektowana została matryca LED. Jej budowa związana była z określeniem kilku podstawowych parametrów, które determinowały jej funkcjonalność. Był to jej rozmiar, dobór diod LED oraz sposób montażu do części mechanicznej.

Matryca została zaprojektowana w oprogramowaniu EasyEDA. Jej średnica wynosi 54 mm. Do jej wykonania zastosowano dwa typy diod. Pierwszym z nich są adresowalne diody RGBW, które pozwalają na sterowanie natężeniem oraz barwą światła każdej diody indywidualnie. Drugim typem są białe diody z możliwością regulacji ich

jasności z zastosowaniem odpowiedniego wypełnienia w sygnale PWM. Diody białe znajdują się po zewnętrznej stronie matrycy, co zostało pokazane na rysunku 7. Połączone szeregowo po trzy tworzą one łańcuchy wraz z rezystorem ograniczającym prąd. Następnie szeregi połączone zostały równolegle, co dało w sumie dwanaście sekcji po trzy diody. Ma to dodatkowe korzyści. W przypadku awarii, w której ucierpiałyby jedna dioda, odcięty od zasilania zostaje tylko jeden łańcuch, a pozostałe pracują bez zmian w parametrach zasilania. Adresowalne diody RGBW zostały umieszczone w środkowej części matrycy, a dzięki ich systematycznemu rozmieszczeniu możliwe jest tworzenie prostych znaków świetlnych. Kolejnym istotnym aspektem jest dobór sposobu montażu matrycy do segmentu mechanicznego. Predystynowany jest on przez możliwości układu napędowego do poruszania matrycą. Zdecydowano się na montaż przy użyciu trzech śrub, co zapewnia trwałość konstrukcji. W celu zasilania matrycy i połączenia ze sterownikiem zaprojektowano dwa konektory z czterema wyprowadzeniami.

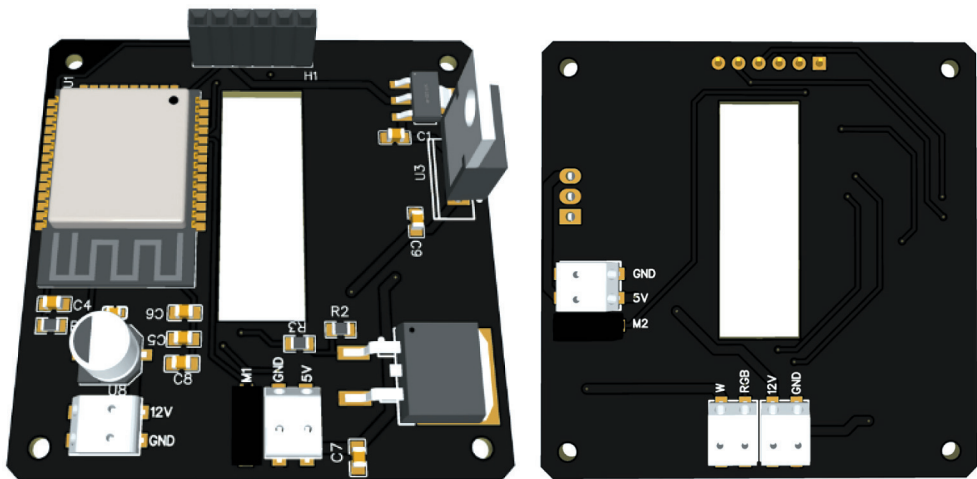


Rys. 7. Budowa matrycy LED

W ostatnim etapie tworzenia części sprzętowej wykonano płytkę sterującą, która zajmuje sięysterowaniem matrycy LED oraz serwomechanizmów. Sercem całego układu jest mikrokontroler ESP32, który umożliwia kompleksowe sterowanie wszystkimi niezbędnymi elementami oraz posiada moduł Wi-Fi. Pozwala to na wykorzystanie protokołu MQTT. W celu wykonania płytki sterującej niezbędne było dobranie odpowiednich komponentów umożliwiających m.in. konwersję poziomów napięć zasilania, sterowanie diodami LED oraz zabezpieczenie układu. Do tych celów wykorzystano elementy, takie jak: stabilizatory, tranzystory, rezystory, kondensatory oraz diody zabezpieczające (rys. 8).

Sterownik posiada port, który umożliwia wgranie oprogramowania do komunikacji z serwerem nadrzędnym, przetwarzania otrzymywanych sygnałów oraz realizacji

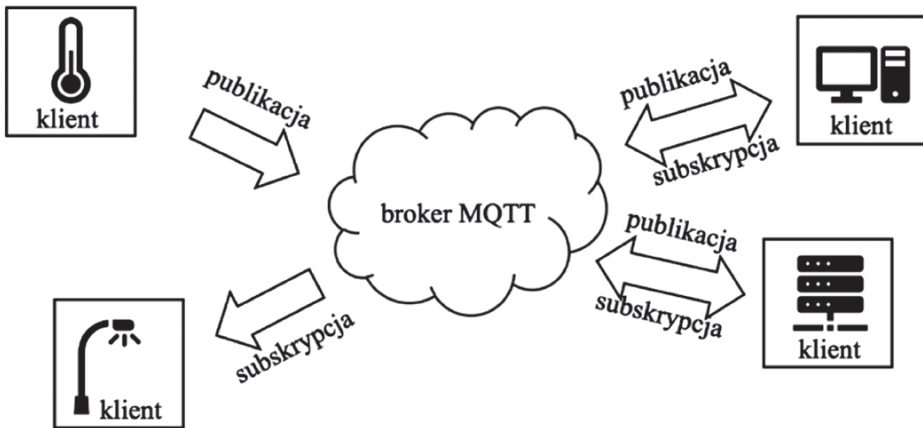
algorytmów sterowania przez odpowiednieysterowanie elementów wykonawczych, takich jak serwomechanizmy i diody emitujące światło. Umieszczono na nim także pięć konektorów, które służą do połączenia sterownika z matrycą, dwoma serwomechanizmami oraz podłączenia napięcia zasilającego o wartości 12 V. Kształt sterownika został dobrany w taki sposób, aby możliwe było umieszczenie go w spodniej części modułu mechanicznego, a tym samym maksymalne wykorzystanie przestrzeni urządzenia.



Rys. 8. Sterownik urządzenia wykonany w oprogramowaniu EasyEDA

3.2. Architektura oprogramowania

Algorytm sterujący modulem oświetleniowym został zaimplementowany z użyciem narzędzia ESPHome. Jest to środowisko umożliwiające konfigurację mikrokontrolerów za pomocą instrukcji tekstowych oraz zdalne sterowanie nimi przez systemy automatyki domowej. Pomimo uproszczonej składni implementacja poszczególnych funkcji wymaga znajomości problematyki realizowanego zagadnienia w celu odpowiedniego wykorzystania dostępnych w środowisku bibliotek. Kluczowy w tym przypadku jest właściwy dobór wartości konfiguracyjnych, takich jak na przykład częstotliwość sygnału czy współczynniki korygujące dla konkretnych podzespołów. Łączność z modulem oparta została na protokole MQTT, który przewiduje komunikację na zasadzie wymiany danych między pojedynczą jednostką centralną, zwaną brokerem, oraz klientami, którzy subskrybują wybrane, zdefiniowane w brokerze tematy. Klienci mogą również publikować swoje wiadomości w wybranych tematach i w ten sposób wymieniać dane z pozostałymi klientami. W przypadku opracowanego modułu każdy element wykonawczy ma swój unikatowy temat, podczas zmiany wartości którego dochodzi do skorygowania odpowiedniego parametru (rys. 9).



Rys. 9. Schemat komunikacji za pośrednictwem protokołu MQTT

Sposób przetwarzania sygnałów przez układ sterujący modułem przewiduje zmianę jednostek parametrów odczytanych z brokera na odpowiednie sygnały sterujące podzespołami. Przykładowo wartość barwy światła odczytaną w kelwinach należy przetworzyć na składowe RGB, a kierunek podany w postaci współrzędnych (x, y) na kąty obrotu poszczególnych serwomechanizmów, a następnie na współczynnik wypełnienia sygnału PWM.

Wartość mocy świecenia diod LED SMD2835 (diody białe) zadawana jest poprzez sygnał PWM o częstotliwości 50 Hz, a zasadniczo przez zmianę współczynnika jego wypełnienia. W tym przypadku wykorzystywany jest pełen zakres regulacji, czyli 0–100%.

Diody LED RGBW WS2812 sterowane są za pomocą protokołu SPI, w którym zakodowane są wartości dotyczące koloru oraz natężenia świecenia diod. Chcąc uzyskać światło o ciepłej barwie, należy wysterować diody w taki sposób, aby wartości składowej czerwonej przeważały nad wartościami definiującymi inne kolory. Budowa diod pozwala również na ustalanie parametrów osobno dla każdej z nich, gdyż każda ma własny adres. W efekcie umożliwia to dowolne włączenie i wyłączenie, a także ustalanie koloru każdej diody z osobna.

Do zadawania położenia serwomechanizmów wykorzystywany jest również sygnał PWM, jednak w celu zadania kąta obrotu stosowany jest wąski zakres wartości współczynnika wypełnienia pomiędzy 0,5% a 1% przy częstotliwości 50 Hz.

Sygnały dostarczane przez MQTT do modułu mogą pochodzić z wielu różnych źródeł, takich jak czujniki natężenia oświetlenia, czujniki ruchu czy stacji pogodowych. Wykorzystywane mogą być również kamery z algorytmami rozpoznawania i śledzenia postaci, dzięki którym możliwe jest określenie obecności i położenia osób w pomieszczeniu w celu dostosowania odpowiednich wartości oświetlenia oraz jego kierunku.

W instalacji wykonanej w ramach projektu pojedynczym modułem oświetleniowym zarządza serwer z zainstalowanym systemem Home Assistant, który przesyła wartości parametrów oświetlenia do jednostki sterującej modułem. Takie rozwiązanie zapewnia stabilność, a także możliwość magazynowania i odtwarzania danych historycznych, które następnie umożliwiają analizę zachowań użytkownika i lepsze dopasowywanie jasności i barwy do indywidualnych potrzeb, zgodnie z ideą HCL.

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono koncepcję realizacji oświetlenia skupionego na człowieku oraz skonstruowany i wytworzony autorski moduł oświetleniowy zrealizowany zgodnie z tą ideą. Opracowane urządzenie spełnia założenia HCL, takie jak: regulowana barwa i natężenie emitowanego światła, łączność bezprzewodowa umożliwiająca zadawanie wspomnianych parametrów oraz możliwość łączenia pojedynczych modułów w macierze. Cechy te znacznie ułatwiają tworzenie bardziej złożonych instalacji opartych na modułach oraz dostosowywanie ich pod konkretne pomieszczenia. Elastyczność rozwiązania zapewniona jest także przez niezależne sterowanie nie tylko każdym modułem, ale w przypadku diod RGB nawet każdym pojedynczym elementem.

Niespotykanym na rynku rozwiązaniem oświetlenia budynkowego jest zdolność modułu do pozycjonowania matrycy. Ukierunkowanie wiązki światła przez obrót i pochylenie elementu wykonawczego rozszerzają znacznie jego możliwości adaptacji do oświetlanych powierzchni oraz warunków wewnątrz pomieszczenia. Odpowiednie algorytmy oraz dane wejściowe z czujników pozwalają na przykład skierować światło w obszary, gdzie znajdują się ludzie, albo ograniczyć oświetlanie miejsc, gdzie dociera więcej światła słonecznego na rzecz tych bardziej oddalonych lub osłoniętych od promieni wpadających przez okna. Takie funkcje nie tylko wspierają człowieka oraz jego naturalny cykl dobowy, ale również pozwalają na oszczędność energii zużywanej przez oświetlenie.

Przeprowadzone badania i zrealizowane testy wskazały drogę i kierunek dalszych prac zmierzający do rozwoju opracowanej koncepcji. Jest to przede wszystkim opracowanie stabilniejszej formy komunikacji, która w odróżnieniu od wi-fi nie będzie aż tak wrażliwa na zmiany parametrów otoczenia i przeszkody w postaci ścian i drzwi. Następnie warto rozważyć dobór diod LED jako lepiej przystosowanych do rozwiązań oświetlenia skupionego na człowieku. Cechą modułu wymagającą jeszcze dopracowania jest również ogniskowanie (skupianie i rozpraszanie) wiązki światła. W tym przypadku remedium okazuje się optyka w postaci soczewki skupiającej światło emitowane

przez matrycę lub pojedyncze diody. Rezultatem projektu jest również rozpoznanie różnych poziomów realizacji tej optyki jako rozwiązania systemowego (na poziomie diody, na poziomie obudowy diody, na poziomie matrycy diodowej lub na poziomie źródła światła). To pozornie trywialne zagadnienie ma kluczowe znaczenie podczas kastomizacji takiego systemu i wpływa na możliwości operowania wiązką światła.

Niniejsza praca powstała w ramach dofinansowania projektów Kół Naukowych w ramach programu IDUB – Wsparcie Kół Naukowych, Działanie 12 pt. „System inteligentnego oświetlenia z możliwością śledzenia obiektów przy wykorzystaniu rozwiązań wizyjnych zarządzany za pomocą algorytmów sztucznej inteligencji” – numer wniosku 8966. Dodatkowo pragniemy serdecznie podziękować firmie UT sp. z o.o. za udzielone wsparcie materiałowe.

Literatura

- Blume C., Garbazza C., Spitschan M., 2019, *Effects of light on human circadian rhythms, sleep and mood*, Somnologie, vol. 23(3), s. 147–156, <https://doi.org/10.1007/s11818-019-00215-x>.
- Brown T.M., Brainard G.C., Cajochen C., Czeisler C.A., Hanifin J.P., Lockley S.W., Lucas R.J., Münch M., O’Hagan J.B., Peirson S.N., Price L.L.A., Roenneberg T., Schlangen L.J.M., Skene D.J., Spitschan M., Vetter C., Zee P.C., Wright K.P., 2022, *Recommendations for daytime, evening, and nighttime indoor light exposure to best support physiology, sleep, and wakefulness in healthy adults*, PLoS Biology, vol. 20(3), <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001571>.
- COMSOL Blog, *Calculating the Emission Spectra from Common Light Sources*, <https://www.comsol.com/blogs/calculating-the-emission-spectra-from-common-light-sources> [dostęp: 6.06.24].
- Conus V., Geiser M., 2020, *A Review of Silent Substitution Devices for Melanopsin Stimulation in Humans*. Photonics, vol. 7, <https://doi.org/10.3390/PHOTONICS7040121>.
- Hankins M.W., Peirson S.N., Foster R.G., 2008, *Melanopsin: an exciting photopigment*, Trends in Neurosciences, vol. 31(1), s. 27–36, <https://doi.org/10.1016/J.TINS.2007.11.002>.
- Jalali M.S., Jones J.R., Tural E., Gibbons R.B., 2024, *Human-Centric Lighting Design: A Framework for Supporting Healthy Circadian Rhythm Grounded in Established Knowledge in Interior Spaces*, Buildings, vol. 14(4), <https://doi.org/10.3390/buildings14041125>.
- Nauka w Polsce, *Medyczny Nobel za zegar biologiczny*, <https://naukawpolsce.pl/aktualnosci/news%2C459900%2Cmedyczny-nobel-za-zegar-biologiczny.html> [dostęp: 6.06.24].

- Petrinska I., Nikolova K., 2023, *Investigation of the Non Image Forming Effects of Existing Human Centric Lighting Systems*, 2023 Eight Junior Conference on Lighting (Lighting), 23–25 września 2023 Sozopol, Bułgaria, IEEE, s. 1–5, <https://doi.org/10.1109/Lighting59819.2023.10299458>.
- Wantuch A., Durlík F., 2023, *Analiza parametrów oświetlenia elektrycznego mających wpływ na zdrowie i samopoczucie człowieka*, XXXII Symposium Środowiskowe PTZE, 11–14 czerwca 2023, Łochów, Polska, Polskie Towarzystwo Zastosowań Elektromagnetyzmu, s. 274–276.
- Wever R.A., Polásek J., Wildgruber C.M., 1983, *Bright Light Affects Human Circadian Rhythms*, Pflugers Archiv: European Journal of Physiology, vol. 396(1), s. 85–87, <https://doi.org/10.1007/BF00584704>.