

16-kanalowy moduł LED do systemu wspomagającego rozwój roślin sterowany za pomocą Raspberry Pi

Streszczenie. Obecnie dużym zainteresowaniem cieszą się badania wpływu światła na rośliny. Opracowywane są nowe rozkłady widma światła, które wpływają na poprawę zarówno ilości plonów i jakości dokonywanych zbiorów. W celu uproszczenia wprowadzania zmian widma w procesach badawczych oraz w celu przyspieszenia i zrównoleżenia badań w tym zakresie został opracowany niedrogi programowalny moduł LED pozwalający sterować 16 niezależnymi stałoprądowymi kanałami. Niska cena proponowanego rozwiązania oraz jeden sterownik obsługujący do 12 modułów LED może przyczynić się do bardziej efektywnych poszukiwań optymalnego widma dla poszczególnych gatunków roślin.

Abstract. Nowadays, research on the horticulture light is receiving a lot of interest. Scientists are looking for the best light spectra and are developing new spectra to improve the quantity and quality of crops. To simplify the introduction of spectrum changes in research processes and to accelerate research in this area, an inexpensive programmable 16 channels LED module has been developed. The low price of the described solution and one controller supporting up to 12 modules may help in a more effective search for the optimal spectrum for individual plant species. (16-channel programmable horticulture LED module controlled by Raspberry Pi)

Słowa kluczowe: promieniowanie w zakresie fotosyntezy, LED, sprzęt oświetleniowy, oświetlenie roślin

Keywords: photosynthetically active radiation, LED, lighting equipment, horticulture, plants illumination

Wstęp

W czasach wysokich cen energii elektrycznej oraz wysokich kosztów nawozów bardziej aktualne niż kiedykolwiek jest poszukiwanie jak najwydajniejszego oświetlenia do uprawy roślin. Zawirowania geopolityczne oraz niekorzystne warunki atmosferyczne w kluczowych dla produkcji żywności częściach świata w ostatnim czasie poważnie ograniczyły ilość dostępnych na rynku świeżych warzyw i owoców. Niektóre sieci sklepów w Wielkiej Brytanii wprowadziły limity na zakup ogórków, pomidorów, sałaty oraz papryki [1]. Rozwiązaniem problemów z niestabilnymi warunkami atmosferycznymi wydają się być farmy wertykalne [2, 3] oraz doświetlone szklarnie z kontrolowaną temperaturą [4]. Farmy wertykalne w Polsce nie są jeszcze popularne, jednak istnieje przestrzeń do rozwoju tego sektora [5]. Na przestrzeni ostatnich lat powstało wiele publikacji poświęconych badaniom wpływu światła na rośliny. Przytaczany jest również wpływ sprawności oświetlenia w kontekście oszczędności energii w wypadku upraw o stabilizowanej temperaturze [6]. W wypadku niskich temperatur otoczenia niska sprawność oprawy oświetleniowej dostarcza sporo energii cieplnej. Jednak w wypadku konieczności zastosowania chłodzenia niska sprawność systemu oświetleniowego bardzo negatywnie wpływa na bilans energetyczny. W Polsce obniżenie temperatury może być wymagane latem oraz późną wiosną i wczesną jesienią. W regionach o wyższych średniorocznych temperaturach taka sytuacja może występować przez większość roku. Przykład stanowią kraje bliskiego wschodu [7].

Popularność zagadnienia wśród różnych zespołów badawczych pokazuje, jak poważnym i ważnym społecznym zagadnieniem jest produkcja żywności [8–10]. Badania wpływu światła na rozwój roślin prowadzone przez biologów obejmują doświadczenia z użyciem komercyjnie dostępnych źródeł światła z niewielką ilością kanałów do sterowania [11] lub ze stałym widmem [12]. Parametry widma często podawane są w formie stosunku ilości światła czerwonego do niebieskiego [13, 14] lub jako zakresy o szerokości 100 nm każdy [15, 16]. Takie prezentowanie danych w znaczący sposób ogranicza lub wręcz uniemożliwia przeprowadzenie badań porównawczych, ponieważ istnieje bardzo dużo kombinacji spektralnych z użyciem komercyjnie dostępnych diod LED spełniających

opisane parametry. W zdecydowanej większości zmiany ograniczają się do sterowania proporcją ilości światła czerwonego do ilości światła niebieskiego [17, 18]. W celu zwiększenia możliwości sterowania widmem w doświadczeniach mających na celu badanie wpływu promieniowania o danej długości fali na rośliny została przygotowana 16-kanalowa programowalna oprawa oświetleniowa. Pozwala ona na symulację dużej ilości wariantów widmowych możliwych do odtworzenia z wykorzystaniem komercyjnie dostępnych diod elektroluminescencyjnych. Dobrze sparametryzowane komercyjne dostępne oraz niedrogi źródło światła [19] w znaczący sposób mogłoby pomóc w poszukiwaniach nowej wiedzy i zależności związanych z wpływem oświetlenia na rośliny. Opracowana oprawa jest dostosowana wymiarowo do komercyjnie dostępnych szaf fitotronowych różnych firm, dzięki czemu w ten sposób stanowiska badawcze cechują się kontrolowanym oświetleniem oraz temperaturą i wilgotnością. Zaprojektowane źródło światła sterowane z wykorzystaniem platformy komputerowej Raspberry Pi [20] może stanowić znaczący krok w interdyscyplinarnym rozwoju oświetlenia do uprawy roślin. Jej programowanie w środowisku Python jest obecnie bardzo popularne [21], ponieważ jest prostsze niż programowanie niskopoziomowe. Jeszcze do niedawna tego typu rozwiązania wykonywano w oparciu o mikrokomputery z wyświetlaczem, programowane w języku C [22].

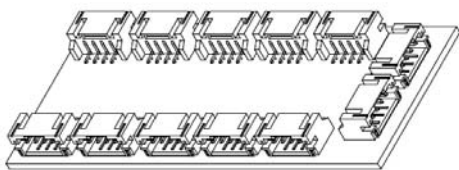
Układ zasilania

Na potrzeby przygotowania stanowiska badawczego została opracowana oprawa, w której każdy z 16 kanałów zasilany jest z niezależnej przetwornicy stałoprądowej w konfiguracji BUCK [23]. Jako sterownik przetwornicy wykorzystano układ scalony PT4115 [24, 25]. W zależności od wymagań oraz dostępności może również zostać zastosowany układ AL8861 firmy DIODES. Oba układy dostępne są w obudowie SOT-89-5. Główną różnicą między nimi jest maksymalny prąd wyjściowy oraz maksymalne napięcie zasilania. W wypadku układu PT4115 maksymalne natężenie prądu wyjściowego wynosi 1200 mA, a maksymalne napięcie wejściowe 30 V, podczas gdy dla układu AL8861 maksymalne natężenie prądu wyjściowego wynosi 1500 mA przy maksymalnym napięciu wejściowym 40 V. W zależności od potrzeb każdy z dostępnych kanałów

umożliwia korzystanie z obu układów w jednym module. Całość może być podłączona do układu zasilania z akumulatorem buforowym 24 V (wykorzystując układy PT4115 oraz AL9961) lub 36 V (wykorzystując układ AL8861), aby ograniczyć wpływ zaników prądu oraz podtrzymać pracę układu w wypadku przerwy w dostawie energii elektrycznej przez sieć energetyczną. Jest to niezwykle ważne, ponieważ każda przerwa w dostawie prądu ma wpływ na wynik badań. Uprawy potrafią trwać wiele tygodni, a taki incydent może zniweczyć wielotygodniowy trud badacza. Zasilacz buforowy może być zasilany z sieci energetycznej lub z odnawialnych źródeł energii takich jak farmy wiatrowe czy panele fotowoltaiczne [26].

Komunikacja modułu ze sterownikiem

Sterowanie odbywa się za pomocą szeregowej dwukierunkowej magistrali I²C. Każdy moduł został wyposażony w 16-kanalowy i 12-bitowy kontroler I²C PCA9685. Sygnały dochodzące do modułu są galwanicznie odizolowane od reszty układu, co zapewnia poprawną odporność układu na narażenia zewnętrznie indukowane w przewodach komunikacyjnych. Każdy moduł posiada indywidualny adres. W celu uproszczenia podłączenia został zaprojektowany adapter do Raspberry PI, posiadający osobne złącze dla 12 niezależnych modułów. Złącze to zostało przedstawione na rysunku 1. Adapter podłącza się do Raspberry PI za pomocą złącza szpilkowego typu goldpin umieszczonego na spodniej warstwie.



Rys. 1. Adapter do Raspberry PI

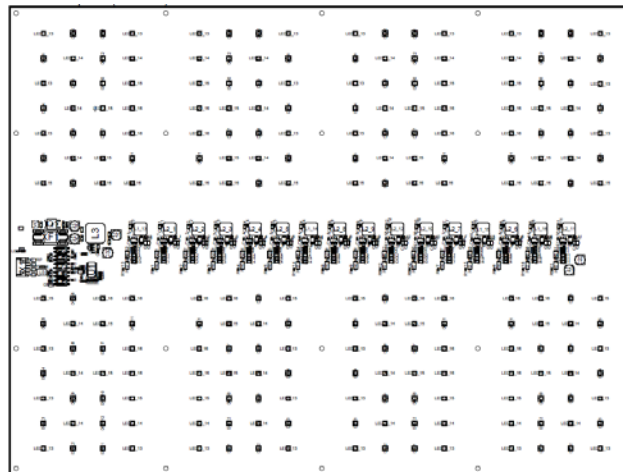
Raspberry PI pozwala na generowanie dużej ilości sygnałów PWM (ang. pulse-width modulation) Występują duże problemy z wykorzystaniem wirtualnych zegarów PWM generowanych w programie. Ze względu na przerwaniowy charakter wykonywania operacji obsługa dotykowego ekranu oraz obsługa interfejsu graficznego przez ten sam procesor powodowała liczne chwilowe zaniki generowanego sygnału. W związku z powyższym zdecydowano się na wykorzystanie zewnętrznego sterownika PWM na każdym module niezależnie.

Dobór diod LED

Opracowany moduł umożliwia montaż diod w najbardziej popularnych obudowach 3535. Projekt został wykonany w taki sposób, aby pad termiczny nie był połączony z żadnym potencjałem. Dzięki temu mogą być montowane diody z padem termicznym izolowanym elektrycznie oraz diody mające pad termiczny połączony z anodą lub katodą. Każdy układ zasilania steruje 8 diodami połączonymi szeregowo. Przewidziano także 4 kanały na diody średniej mocy w obudowach 2835. W tym wypadku, ze względu na mniejszą moc diod, zastosowano połączenie szeregowo-równoległe 32 diod w ramach jednego kanału. Widok modułu zaprezentowano na rys. 2. Diody połączono w czterech równoległych szeregach po osiem diod każdy. Dzięki takiemu rozwiązaniu wszystkie kanały charakteryzują się zbliżoną mocą. Diody użyte w prezentowanym module przedstawiono w tabeli 1, a ich widma na rysunku 3.

W zestawieniu znalazło się wiele rodzajów diod białych o różnych temperaturach barwowych CCT (ang. *correlated*

colour temperature). Jest to związane z możliwością badania szerokiego widma światła, pozwalającego znaleźć kompromis w parametrach światła korzystnego dla ludzi oraz dla roślin. Związane jest to z silnymi trendami w projektowaniu i integracji zieleni z architekturą. W związku z tym oświetlanie przestrzeni zarówno użyteczności publicznej jak i biur oraz prywatnych rezydencji, gdzie ze względu na wielkość obiektu dostęp do światła dziennego jest ograniczony, może zostać uzupełnione o odpowiednie światło sztuczne [27, 28]. Tego typu badania prawdopodobnie będą stanowiły kolejny krok w rozwoju techniki świetlnej.



Rys. 2. Wizualizacja 16-kanalowego modułu LED

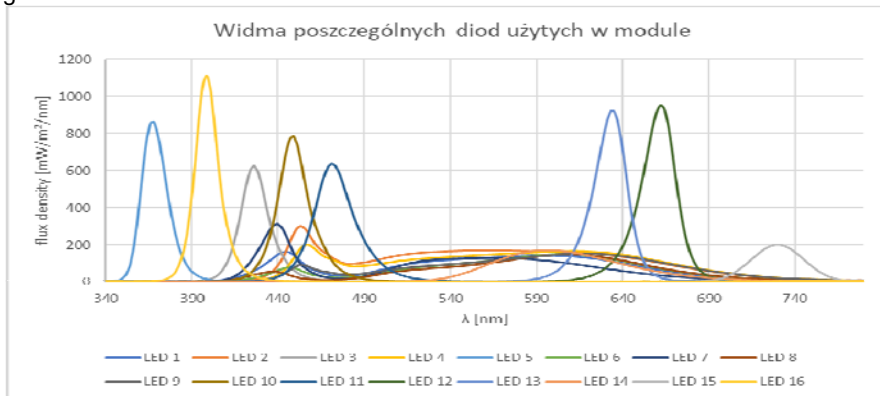
Tabela 1. Wykaz diod użytych w module

	λ lub CCT	CRI	nazwa diody	Ilość diod
LED 1	4000 K	80	XTEAWT-00-CNIV-A0000HDE5-5A2R5-SE	8
LED 2	5000 K	90	JB2835BWT-G-U50GA0000-N0000001-3G0D6	32
LED 3	430 nm	-	LED-PK2N-3LLE-L-S3B	8
LED 4	4000 K	90	JB2835BWT-G-U40EA0000-N0000001-AR	32
LED 5	365 nm	-	LED-PK2B-3LLE-GNVS-U2	8
LED 6	3000 K	80	XTEAWT-E0-0000-C0000HGZ7-7D2R5	8
LED 7	5700 K	70	XTEAWT-E0-CNIV-00000BJE2-2DS5	8
LED 8	2700 K	80	JB2835BWT-G-U27GA0000-N0000001	32
LED 9	3000 K	90	JB2835BWT-G-U30GA0000-N0000001	32
LED 10	450 nm	-	XPGDRY-L1-0000-00601-H37F4	8
LED 11	470 nm	-	XPEBBL-L1-0000-00302-B5M3-G	8
LED 12	660 nm	-	XPGDPR-L1-CHSP-00F01-33P4-X	8
LED 13	620 nm	-	XPEBRD-L1-0000-00901-R2P4	8
LED 14	1800 K	42	XPEBPA-L1-0000-00D01-Y2Q5	8
LED 15	720 nm	-		8
LED 16	400 nm	-	LED-PK2N-3LLE-SD	8

Istnieje również aspekt ekonomiczny do zastosowania tego typu diod w rozwiązaniach profesjonalnych mających zastosowanie w farmach wertykalnych. Diody białe ze względu na skalę produkcji i wykorzystania są znacząco tańsze od diod monochromatycznych. Widmo diody białej, choć dla roślin nie jest idealne, może stanowić ważną składową pokrywając szeroki zakres długości fal niezbędnych do prawidłowego rozwoju roślin [29]. Użycie diod o wysokim współczynniku oddawania barw CRI (ang. *colour rendering index*) może korzystnie wpłynąć na rozwój

roślin. Do produkcji diod o wysokim współczynniku CRI producenci używają innej mieszanki luminoforu, co wpływa na większą ilość światła w zakresie czerwonym. W module użyto również diody z zakresu ultrafioletu 365 nm ponieważ w ostatnim zaobserwowano zwiększone zainteresowanie naukowców badaniami wpływu promieniowania UV na rośliny [30].

Diody z zakresu niebieskiego o środkowej długości fali 400 nm, jak i diody 430 nm, 450 nm, oraz 470 nm mogą posłużyć lepszemu zrozumieniu reakcji roślin na światło z zakresu niebieskiego w procesie zarówno fotosyntezy jak i fotomorfogenezy [30]. W publikacjach umieszczanych przez biologów opisywany jest wpływ światła niebieskiego z całego zakresu 400–500 nm [31]. Dzięki możliwości sterowania tym zakresem możliwe będzie zbadanie wpływu każdej z danych długości fal oddzielnie.



Rys. 3. Widma diod zaprezentowanych w tabeli 1. zmierzonych spektrometrem w płaszczyźnie uprawy

Sterowanie

Sterowanie realizowane jest za pomocą GUI (ang. *graphical user interface*). Każdy kanał wyposażony jest w suwak lub pole, w które można wprowadzić konkretną wartość wyrażoną w procentach. Za pomocą rozwijanego menu można wybrać moduł, który ma być sterowany. Takie rozwiązanie ogranicza koszty, ponieważ wiele komór fototropowych może być obsługiwane z poziomu jednego mikrokomputera oraz wyświetlacza. Podczas sterowania na ekranie widnieje podgląd widma ustawionego.

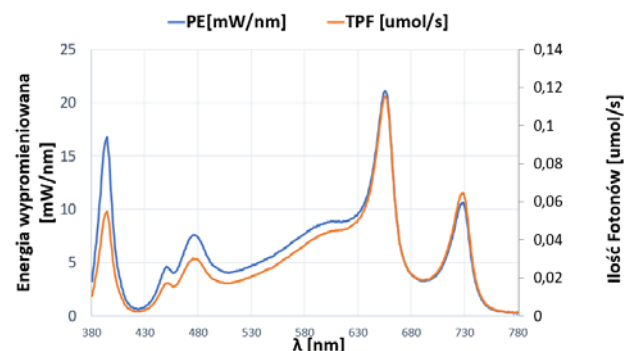
Podgląd widma generowany jest na podstawie danych zmierzonych w poszczególnych komorach. Pozwala to na uwzględnienie charakterystyki absorpcyjnej soldermasksi znajdującej się na powierzchni modułu oraz wnętrza komory. Strumienie oraz widma z poszczególnych kanałów są addytywnie sumowane [33]. Pomiar widma dokonywany był przy temperaturze modułu 55 °C ± 2 °C. Widmo diody zależy w sposób znaczący od temperatury [34]. Dlatego ze względu na wrażliwość roślin na temperaturę moduł nie powinien się rozgrzewać powyżej 55 °C. W komorach witrynowych przewidziane jest chłodzenie za pomocą agregatu, co pomaga ustabilizować temperaturę modułu na wskazanym poziomie. W wypadku diod w obudowach 2835, przy ich połączeniu szeregowo-równoległym, może występować nierównomierność świecenia związana z różnymi wartościami napięcia V_f poszczególnych diod [35]. Dla każdej z 32 diod LED w danym kanale zmierzono wartości strumienia świetlnego za pomocą spektrofotometru GL SPECTIS 1.0 Touch wyposażonego w kulę całkującą GL OPTI SPHERE 48 firmy GL Optic. Rozbieżności w pomiarach wyszły w granicach dokładności osiągniętych w tego typu pomiaru [36].

Dane na podglądzie widma generowane są na podstawie danych radiometrycznych, ponieważ stosowane przez biologów promieniowanie fotosyntetyczne PPF (ang.

W badaniach wykorzystano diodę PC Amber, będącą diodą pomarańczową zrealizowaną za pomocą specjalnego luminoforu, mającą widmo znacząco szersze od diod monochromatycznych. Została ona sklasyfikowana jako dioda 1800 K (z pomiaru uzyskano dokładnie 1863 K).

Diody z zakresu czerwonego mogą być pomocne w dobrze odpowiednich proporcji światła czerwonego z zakresu zbliżonego do maksimum absorpcyjnego chlorofilu (660 nm) oraz produkcji karotenoidów (620 nm). Natomiast światło z zakresu dalekiej czerwieni (720 nm) do tej pory najczęściej było wykorzystywane do indukowania kwitnienia roślin wieloletnich, jednak w ostatnich latach badania wykazały szerszy wpływ tego typu promieniowania na kształt, wygląd oraz ilość plonu [32].

photosynthetic photon flux) jest realizowane tylko w zakresie PAR (ang. *photosynthetically active radiation*) 400–700 nm. Różnice w wyglądzie widma są znaczące, ponieważ PPF prezentuje liczbę fotonów emitowanych przez źródło niezależnie od energii, jaką dany foton reprezentuje, i wyrażana jest w [$\mu\text{mol/s}$]. Pomiar wartości strumienia dla każdego kanału dokonano w sferze integracyjnej 1500 mm wyposażonej w spektrometr HAS1200 firmy Everfine. Różnice przedstawiono na wykresach na rys. 4. Do prezentacji danych, ze względu na szerszy zakres długości fal, zaproponowano nazwę TPF.



Rys. 4. Wykres tego samego widma światła prezentowany w różny sposób

Nie zdecydowano się na symulację natężenia promieniowania na powierzchni uprawy, tylko na emitowany strumień światła ze względu na mnogość rodzajów wykończenia komór fitotronowych oraz w jakiej odległości od źródła będzie znajdowała się powierzchnia uprawy. Wygląd fitotronu ma znaczący wpływ ze względu na kolor jak i sposób wykończenia komór wewnętrznych. Znaczący

wpływ może mieć również stopień zbrudzenia wnętrza. Wszystkie parametry wpływają na wartości refleksyjności oraz charakterystykę absorpcyjną widma przez powierzchnie wewnętrzne komory. Generowanie wartości natężenia jest możliwe do symulowania w programie sterownika, jednak wymaga to każdorazowej kalibracji zestawu poprzez szereg pomiarów dla każdego kanału oraz dla różnych wysokości ustawienia półki. Pomiaru tego samego modułu w różnych komorach fitotronowych pokazanych na rysunku 5 tego samego producenta wykazywały różnice większe od błędu pomiarowego i niepewności pomiarowej zastosowanego przyrządu pomiarowego. W związku z tym wskazane jest każdorazowe zweryfikowanie natężenia oraz widma wynikowego.

Do generowania wykresów wykorzystano bibliotekę „matplotlib” – popularną w rozwiązaniach wykorzystujących język Python.



Rys. 5. Poglądowy przykład zastosowania modułów w fitotronie

Podsumowanie i wnioski

Należy spodziewać się, że zakres badań wpływu światła na rozwój roślin będzie dynamicznie się rozwijał. Oświetlenie wykorzystujące białe oraz barwne diody z możliwością łatwego kształtowania charakterystyki widmowej stwarza szeroką gamę możliwości. Opracowany moduł LED może służyć do celów badawczych w zakresie poznawania wpływu światła na rośliny. Przy poprawnym

skalibrowaniu układu możliwe jest generowanie podglądu widma ustawionego. Pozwoli to w prosty sposób wykorzystać opracowany moduł jako symulator widm innych lamp podczas badań porównujących uzyskane wyniki z danymi literaturowymi oraz jako pozwalający na przebadanie wpływu widma promieniowania optycznego na uprawy pochodzącego z komercyjnych upraw, które ze względu na gabaryt nie mogą zostać umieszczone w komorze fitotronu. W razie potrzeby moduł można wyposażyć w inną kombinację diod pasujących padem lutowniczym do laminatu oraz odpowiednio modyfikując dane w programie sterownika. Daje to ogromne możliwości dostosowania uprawy do planu badań. W budowach 3535 jak i 2835 dostępnych jest dużo więcej wariantów widmowych jak i selekcji diod (np. co 5 nm) w ramach jednej grupy produktowej. W przyszłości możliwe jest rozbudowanie modułu o kontrolę temperatury, dzięki czemu programowo można byłoby wprowadzić alarmy w wypadku przegrzewania się modułu jak i kompensować wpływ temperatury na widmo generowane w podglądzie. Pozwoliłoby to na dokładniejsze prezentowanie uzyskanych danych.

Prace były prowadzone w ramach projektu badawczego Współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu operacyjnego „Inteligentny Rozwój 2014-2020”. Realizowanego przez firmę NIVISS Leszek Łosin Sp. J. pod tytułem „Rodzina liniowych opraw oświetleniowych niPlants przeznaczonych do uprawy roślin z możliwością aktywnej stabilizacji PPFd i automatycznego dopasowania oświetlanego obszaru do wielkości roślin” W niniejszym artykule przedstawiono konstrukcję modułu opracowanego na potrzeby stanowiska badawczego.

Autorzy: mgr inż. Mateusz Feldzensztajn, Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Katedra Metrologii i Optoelektroniki, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, NIVISS Leszek Łosin SP. J. Kopernika 56, 81-411 Gdynia, E-mail: mf@niviss.com; dr hab. inż. Jerzy Pluciński, Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Katedra Metrologii i Optoelektroniki, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: pluc@eti.pg.edu.pl; mgr inż. Sebastian Siedlecki, NIVISS Leszek Łosin SP. J. Kopernika 56, 81-411 Gdynia, E-mail: s.siedlecki@niviss.com; dr inż. Adam Mazikowski, Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Katedra Metrologii i Optoelektroniki, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: adamazik@eti.pg.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Race M., Tesco and Aldi limit sales of tomatoes, peppers and cucumbers, *BBC News*, <https://www.bbc.com/news/business-64729317> (dostęp 07-03-2023)
- [2] Van Gerrewey T., Boon N., Geelen D., Vertical Farming: The Only Way Is Up?, *Agronomy*, 12 (2022), No. 1, 2
- [3] Kozai T., Niu G., Role of the plant factory with artificial lighting (PFAL) in urban areas, In *Plant Factory*, Academic Press, 2020, 7-34
- [4] Xufei Y., Dongliang S., Jingfa L., Changyong Y., Yajun D., Bo Y., Demonstration study on ground source heat pump heating system with solar thermal energy storage for greenhouse heating, *J. Energy Storage*, 54 (2022), 105298
- [5] Kleszcz J., Kmiecik P., Świerżawski J., Vegetable and Gardening Tower of Othmar Ruthner in the Voivodeship Park of Culture and Recreation in Chorzów—The First Example of Vertical Farming in Poland. *Sustainability*, 12 (2020), No. 13, 5378
- [6] Wai T. S., Chaichana C., Maruyama N., Energy cost analysis of growing strawberries in a controlled environment chamber, *Energy Rep.*, 9 (2023), Supplement 1, 677-687
- [7] Alrajhi A.A., Abdulaziz S.A., Alhelal I.M., Rihan H.Z., Fuller M.P., Alsadon A.A., Ibrahim A.A., The Effect of LED Light

- Spectra on the Growth, Yield and Nutritional Value of Red and Green Lettuce (*Lactuca sativa*), *Plants*, 12 (2023), No. 3, 463
- [8] Rihan H.Z., Aljafer N., Jbara M., McCallum L., Lengger S., Fuller M.P., The Impact of LED Lighting Spectra in a Plant Factory on the Growth, Physiological Traits and Essential Oil Content of Lemon Balm (*Melissa officinalis*), *Plants*, 11 (2022), No. 3, 342
- [9] Rihan H.Z., Aldarkazali M., Mohamed S.J., McMulkin N.B., Jbara M.H., Fuller, M.P., A Novel New Light Recipe Significantly Increases the Growth and Yield of Sweet Basil (*Ocimum basilicum*) Grown in Plant Factory System, *Agronomy*, 10 (2020), No. 7, 934
- [10] Pennisi G., Pistillo A., Orsini F., Cellini A., Spinelli F., Nicola S., Fernandez J.A., Crepaldi, A., Gianquinto G., Marcellis L.F.M., Optimal light intensity for sustainable water and energy use in indoor cultivation of lettuce and basil under red and blue LEDs, *Sci. Hortic.*, 272 (2020), 109508
- [11] Modarelli G.C., Paradiso R., Arena C., Pascale S.D., Labeke M.C.V., High Light Intensity from Blue-Red LEDs Enhance Photosynthetic Performance, Plant Growth, and Optical Properties of Red Lettuce in Controlled Environment, *Horticulturae*, 8 (2022), No. 2, 114
- [12] Cammarisano L., Donnison I.S., Robson P.R.H., The Effect of Red & Blue Rich LEDs vs Fluorescent Light on Lollo Rosso Lettuce Morphology and Physiology, *Front. Plant Sci.*, 12 (2021), 603411
- [13] Shimizu H., Saito Y., Nakashima H., Miyasaka J., Ohdoi K., Light Environment Optimization for Lettuce Growth in Plant Factory, *IFAC Proceedings Volumes*, 44 (2011), No. 1, 605-609
- [14] Furuyama S., Ishigami Y., Hikosaka S., Goto E, Effects of Blue/Red Ratio and Light Intensity on Photomorphogenesis and Photosynthesis of Red Leaf Lettuce, *Acta Hortic.*, 1037 (2014), 317-322
- [15] Razzak Md. A., Asaduzzaman Md., Tanaka H., Asao T., Effects of supplementing green light to red and blue light on the growth and yield of lettuce in plant factories, *Sci. Hortic.*, 305 (2022), 111429
- [16] Feldzensztajn M., Mazikowski A., Cegielski T. Analiza efektywności systemów oświetlania roślin na przykładzie uprawy bazylii, *Przegląd Elektrotechniczny*, 10 (2019), nr. 7, 225-229
- [17] Son K.-H., Oh M.-M., Leaf Shape, Growth, and Antioxidant Phenolic Compounds of Two Lettuce Cultivars Grown under Various Combinations of Blue and Red Light-emitting Diodes, *HortScience*, 48 (2013), 988-995
- [18] Pennisi G., Orsini F., Blasioli S., Resource use efficiency of indoor lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivation as affected by red:blue ratio provided by LED lighting, *Sci. Rep.*, 9 (2019), 14127
- [19] Feldzensztajn M., Mazikowski A., Comparison of modelling and measurement results of spectra emitted by a programmable lamp, *Photonics Lett. Poland*, 10 (2018), No. 2, 42-44
- [20] Mazikowski A., Feldzensztajn M., Design and development of lamp of adjustable spectrum, *Photonics Lett. Poland*, 14 (2022), No. 1, 13-15
- [21] Chih H.C., Huang W.T., Yao K.C., Fluorescent Lamp Effect Correction on Capacitive Touch Panel by Timely Update Predicted Covariance Matrix, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 66 (2019), No. 7, 5508-5515
- [22] Cegielski T., Dotykowy panel sterowniczy TFT do systemu oświetleniowego wspomagającego rozwój roślin, *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 3 (2014), 50-53
- [23] Ghamari M.S., Mollae H., Khavari F., Robust self-tuning regressive adaptive controller design for a DC-DC BUCK converter, *Measurement*, 174 (2021), 109071
- [24] Chen Z., Tian L., Li M., Zhang J., Wang Y., LED toning system based on NRF24L01 wireless control, In *2012 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Taiyuan, China, 2012, 656-659
- [25] He X., Wang H., Cao J., Lei D., Design of High-power LED Automatic Dimming System for Light Source of On-line Detection System, In *2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, Chongqing, China, 2020, 1487-1491
- [26] Sabat M., Baczyński D., Szafranek K. „Analiza szeregów czasowych produkcji energii ze źródeł odnawialnych pod kątem niezależności energetycznej wybranego obszaru” *Przegląd Elektrotechniczny*, 93 (2017), nr. 9, 11-15
- [27] Connop S., Vandergert P., Eisenberg B., Collier M. J., Nash C., Clough J., Newport D., Renaturing cities using a regionally-focused biodiversity-led multifunctional benefits approach to urban green infrastructure, *Environ. Sci. Policy*, 62 (2016), 99-111
- [28] Kaltsidi M.P., Fernández-Cañero R., Pérez-Urrestarazu L., Assessment of different LED lighting systems for indoor living walls, *Sci. Hortic.*, 272 (2020), 109522
- [29] Lee, H., Park, S.W., Pham, M.D. Effect of the light spectrum of white LEDs on the productivity of strawberry transplants in a plant factory with artificial lighting. *Hortic. Environ. Biotechnol.*, 61 (2020), 971-979
- [30] Takshak S., Agrawal S., Defense potential of secondary metabolites in medicinal plants under UV-B stress, *J. Photochem. Photobiol. B*, 193 (2019), 51-88
- [31] Han S., Liu Y., Bao A., Zeng H., Huang G., Zhang M.G.C., Zhang Q., Lu J., Wu M., Guo L., OsCSN1 regulates the growth of rice seedlings through the GA signaling pathway in blue light, *J. Plant Physiol.*, 280 (2023), 153904
- [32] Legendre R., Iersel M.W., Supplemental Far-Red Light Stimulates Lettuce Growth: Disentangling Morphological and Physiological Effects, *Plants*, 10 (2021), No. 1, 166
- [33] Budzuński Ł., Zajkowski M. Modyfikacja parametrów kolorymetrycznych w oprawach oświetleniowych ze źródłami LED, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr 7, 67-71
- [34] Oleksy M., Kraśniewski J., Janke W., Wpływ temperatury na charakterystyki optyczne i elektryczne diod LED mocy, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 9, 83-85
- [35] Czech E., Fryc I., Sterowanie zasilaniem barwnych LED-ów oprawy oświetleniowej, umożliwiające emisję stałego, niezależnego od warunków pracy, strumienia świetlnego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 1, 270-272
- [36] Tabaka P., Jakubowski P., Fryc I., Analiza wpływu czułości widmowej spektrometrii na niedokładność pomiarów kolorymetrycznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93 (2014), nr 1, 93-96