

Wojciech GRZESIAK
Marek ŻUPNIK
Renata WOJCIECHOWSKA

PRAKTYCZNA REALIZACJA WIELOSTANOWISKOWEGO PROGRAMOWALNEGO SYSTEMU DOŚWIETLANIA ROŚLIN ZBUDOWANEGO W OPARCIU O TECHNOLOGIE SSL LED

STRESZCZENIE *W artykule zaprezentowano praktyczną realizację sześciostanowiskowego systemu doświetlania roślin, zbudowanego w oparciu o najnowsze osiągnięcia technologii SSL LED. System został zaprojektowany i wykonany dla potrzeb projektu badawczego nr 2011/01/B/NZ9/00058 finansowanego przez NCN (2011-2014) i realizowanego na Wydziale Ogrodniczym Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie. Prezentowany system składa się z 24 lamp LED oświetlających sześć stanowisk. Każde ze stanowisk, którego parametry mogą być niezależnie sterowane i programowane, zostało wyposażone w cztery lampy LED o jednakowych charakterystykach spektralnych.*

W artykule przedstawiono strukturę systemu, możliwości jego programowania, charakterystyki spektralne lamp oraz zaprezentowano przykładową mapę rozkładu natężenia oświetlenia jednego ze stanowisk, a także przedyskutowano możliwości jej modyfikacji. Przeprowadzono również wstępną ocenę przydatności poszczególnych stanowisk w aspekcie badań wpływu światła generowanego przez diody LED na plonowanie oraz właściwości fizjologiczne i prozdrowotne roszponki warzywnej.

Słowa kluczowe: *technologia SSL LED, dioda LED, doświetlanie roślin, oprawa oświetleniowa, system sterowania, algorytm sterowania*

dr inż. Wojciech GRZESIAK

e-mail: grzesiak@ite.waw.pl

Instytut Technologii Elektronowej Oddział w Krakowie
ul. Zabłocie 39, 30-701 Kraków

mgr inż. Marek ŻUPNIK

e-mail: marek@pxm.pl

Firma PXM w Krakowie
ul. Przemysłowa 12, 30-701 Kraków

dr hab. inż. Renata WOJCIECHOWSKA

e-mail: rwojciechowska@ogr.ur.krakow.pl

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja
al. Mickiewicza 21, 31-120 Kraków

1. WSTĘP

Światło jest jednym z najważniejszych czynników środowiskowych, determinujących wzrost roślin. Stanowi nie tylko źródło energii w procesie fotosyntezy, ale także pełni liczne funkcje regulacyjne i sygnałne związane z rozwojem roślin. W kolejnych etapach ontogenezy (rozwój wegetatywny, rozwój generatywny) ważna jest zarówno liczba zaabsorbowanych fotonów, jak i długość fal świetlnych, docierających do roślin. Badacze fizjologii roślin są zgodni co do tego, że najlepsze efekty pod względem stymulacji fotosyntezy oraz zjawisk morfogenetycznych można uzyskać stosując światło niebieskie oraz czerwone, którego doskonałym źródłem są lampy ledowe [2, 5]. Zdolność do absorpcji światła o ww. barwach wiąże się z powszechnym występowaniem w komórkach roślinnych specyficznych fotoreceptorów, takich jak chlorofil a – z maksimum absorpcji w zakresie 430 i 640 nm, chlorofil b – 450 i 660 nm, karotenoidy – 440 i 480 nm, kryptochrom – 435 nm, fototropina – 450 nm, zeaksantyna – 450 i 480 nm czy też fitochromy (forma P_R – 660 nm i forma P_{FR} – 730 nm) [10]. Wymienione fotoreceptory są albo bezpośrednio zaangażowane w proces zamiany energii świetlnej w chemiczną (chlorofile, karotenoidy), albo po zaabsorbowaniu konkretnej długości fali świetlnej uruchamiają szereg wewnątrz- i międzykomórkowych zdarzeń, prowadzących do ujawnienia specyficznej reakcji fizjologicznej. Do reakcji tych należą między innymi zahamowanie wzrostu wydłużeniowego pędu, akumulacja antocyjanów i flawonoidów, indukowanie enzymu wiążącego CO_2 w fotosyntezie (RUBISCO) oraz stymulowanie syntezy białek wiążących chlorofil a i b (zjawiska regulowane przez kryptochromy), fototropizm, otwieranie aparatów szparkowych, ruch chloroplastów, hamowanie wzrostu pędu, rozwój liści (regulowane przez fototropiny) oraz kiełkowanie nasion fotoblastycznych, wydłużanie się międzywęźli, tworzenie organów zapasowych, rozwój blaszek liściowych, indukcja kwitnienia, synteza chlorofilu i barwników antocyjanowych, regulacja sezonowości wzrostu i rytmów dobowych – zjawiska zależne od proporcji fitochromu formy P_R do P_{FR} . Wyniki wielu badań wskazują, że stosując światło o odpowiedniej barwie można wpłynąć na udoskonalenie wielu parametrów jakościowych roślin, takich jak wzrost substancji bioaktywnych oraz zwiększenie potencjału antyoksydacyjnego roślin [9, 6]. W cytowanych pracach autorzy wykazali dużą przydatność szczególnie światła niebieskiego i czerwonego, emitowanego przez diody do modyfikacji tych procesów.

Do doświetlania (od kultur *in vitro* do upraw szklarniowych) najpowszechniej stosowanymi sztucznymi źródłami światła są nadal lampy fluorescencyjne, metalohalogenkowe oraz wysokoprężne lampy sodowe. Jednak coraz częściej zastępowane są one lampami ledowymi [8]. Badania nad zastosowaniem światła diodowego w uprawie roślin prowadzone są od połowy lat 80. XX wieku. Pierwsze eksperymenty dotyczyły doświadczeń na niewielką skalę z sałatą, szpinakiem, ziemniakiem i pszenicą [1]. Przełomem w doświetlaniu roślin na większą skalę było skonstruowanie w 2006 roku w USA pierwszego prototypu lampy w technologii SSL LED w następstwie pojawienia się na rynku diod o mocy większej niż 1 Wat [9]. Obecnie nowoczesne technologie SSL LED mają coraz większe zastosowanie w różnych gałęziach ogrodnictwa, włącznie z doświetlaniem roślin w uprawach szklarniowych ([12, 14, 7, 13]). Dynamicznie rozwijające się systemy SSL LED wychodzą naprzeciw nie tylko potrzebom fizjologicznym roślin, ale także specyfice doświetlania roślin w warunkach szklarniowych.

Intensywne badania prowadzone w ostatnich latach pozwalają uzyskać coraz doskonalsze modele lamp i systemów do doświetlania roślin, łącznie z elastycznym sterowaniem składu spektralnego lamp LED i czasem emisji światła [3, 4, 15].

Celem artykułu jest zaprezentowanie praktycznej realizacji systemu doświetlania roślin, zbudowanego w oparciu o najnowsze osiągnięcia technologii SSL LED, który testowano w szklarni Wydziału Ogrodniczego Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie oraz krótka ocena jego przydatności w aspekcie wpływu na plonowanie oraz wybrane właściwości prozdrowotne rozspanki warzywnej.

2. OPIS SYSTEMU

System został zaprojektowany i wykonany w sposób przedstawiony na schemacie blokowym pokazanym na rysunku 1. Składa się on z części sterującej i podłączonego do niej zestawu 24 lamp doświetlających sześć stanowisk.

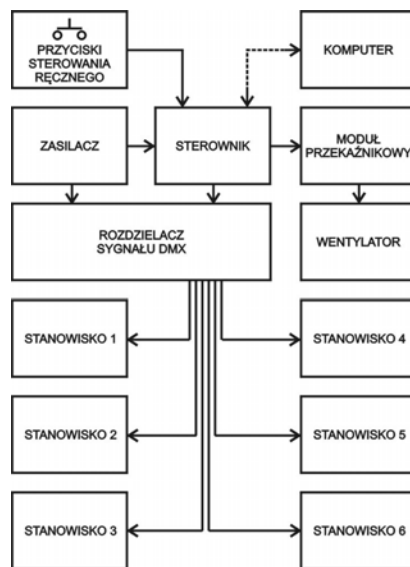
Część sterująca pozwala na indywidualne sterowanie jasnością każdego koloru w pojedynczej lampie i intensywnością świecenia każdej lampy. Dzięki takiemu rozwiązaniu można na potrzeby eksperymentu wydzielić różne grupy upraw i doświetlać je w tym samym czasie światłem o różnych charakterystykach spektralnych.

Sterowanie lampami odbywa się za pośrednictwem protokołu cyfrowego DMX-512 [16], zdefiniowanego przez USITT (United States Institute for Theatre Technology). Jest to obecnie najlepszy i powszechnie stosowany protokół sterowania oświetleniem.

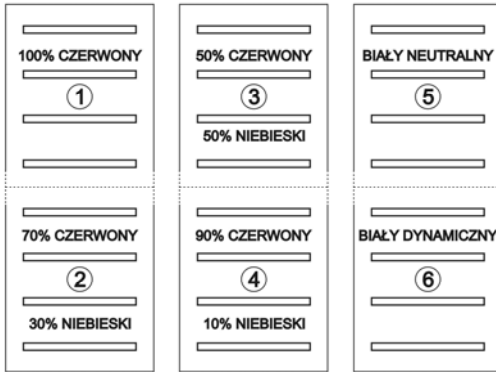
Część sterująca pozwala również na sterowanie algorytmem pracy wentylatora.

Rola komputera ogranicza się wyłącznie do ustawienia parametrów pracy systemu. Po jego odłączeniu zarządzanie całością przejmuje dedykowany sterownik, dzięki czemu system funkcjonuje całkowicie niezależnie według przygotowanego wcześniej algorytmu.

Centralny sterownik kontrolujący proces doświetlania został zaprogramowany w taki sposób, aby niezależnie od pory roku rośliny, będące przedmiotem eksperymentu, były oświetlane (światłem naturalnym lub sztucznym) zawsze przez tyle samo czasu w ciągu dnia. Ponieważ każde doświadczenie trwa przez kilka kolejnych miesięcy, zadaniem sterownika było automatyczne dopasowanie czasu doświetlania do okresu dostępnego światła słonecznego. Efekt ten uzyskano przez ustawienie czasu załączenia doświetlania na 30 minut przed zachodem słońca i wyłączenie doświetlania na 8 godzin przed wschodem słońca.



Rys. 1. Schemat blokowy systemu

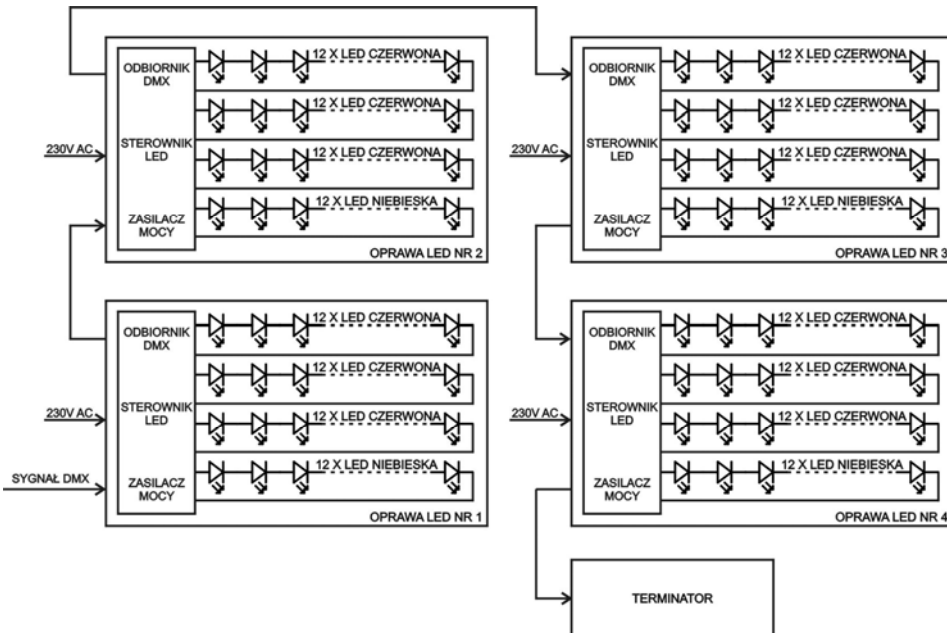


Rys. 2. Konfiguracja rozmieszczenia lamp w jednej z kamer szklarni

Dodatkowo sterownik wymusza ruch powietrza w szklarni poprzez włączanie wentylatorów na czas 15 minut co dwie godziny w przedziale czasowym, w którym rośliny są oświetlane światłem naturalnym lub sztucznym.

Dla potrzeb prowadzenia eksperymentu wydzielono jedną z kamer szklarni i wyposażono ją w 24 lampy zrealizowane w technologii SSL LED zgodnie z konfiguracją przedstawioną na rysunku 2. Na schemacie przedstawiono sześć stanowisk, różniących się charakterystyką spektralną światła docierającego do roślin (objaśnienie w dalszej części tekstu).

Do doświetlania stanowisk numer jeden, dwa i cztery zastosowano lampy w konfiguracji przedstawionej na rysunku 3. Każda z opraw wyposażona jest w 36 diod czerwonych i 12 diod niebieskich.



Rys. 3. Przykładowy schemat blokowy do oświetlania jednego stanowiska

Ze względu na zastosowany sposób sterowania i potrzeby eksperymentu, każde stanowisko jest oświetlane światłem o innej charakterystyce spektralnej.

Charakterystykę spektralną światła emitowanego przez lampy na stanowisku pierwszym pokazano na rysunku 4.

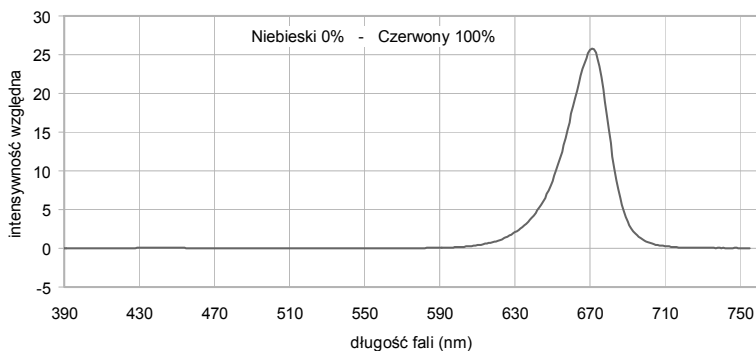
Charakterystykę spektralną światła emitowanego przez lampy na stanowisku drugim pokazano na rysunku 5.

W lampach zainstalowanych na stanowisku nr 3 zastosowano modyfikację polegającą na zastąpieniu jednej grupy diod czerwonych diodami niebieskimi. Charakterystykę spektralną światła emitowanego przez lampy na stanowisku trzecim pokazano na rysunku 6.

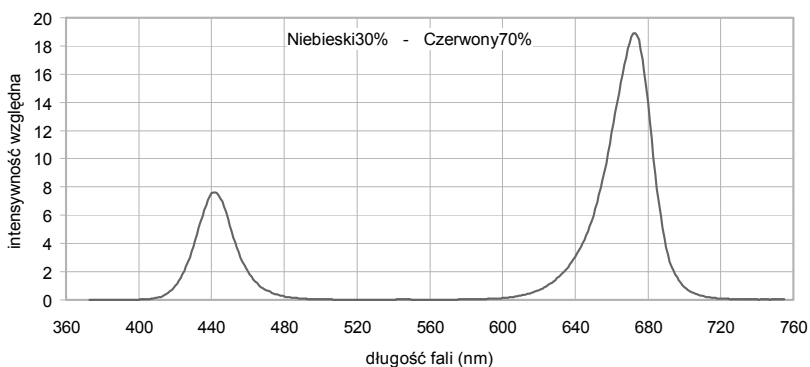
Charakterystykę spektralną światła emitowanego przez lampy na stanowisku czwartym pokazano na rysunku 7.

W lampach zainstalowanych na stanowisku nr 5 zastosowano modyfikację polegającą na zastąpieniu wszystkich grup diod diodami białymi o temperaturze barwowej 3500 K. Charakterystykę spektralną światła emitowanego przez lampy na stanowisku piątym pokazano na rysunku 8.

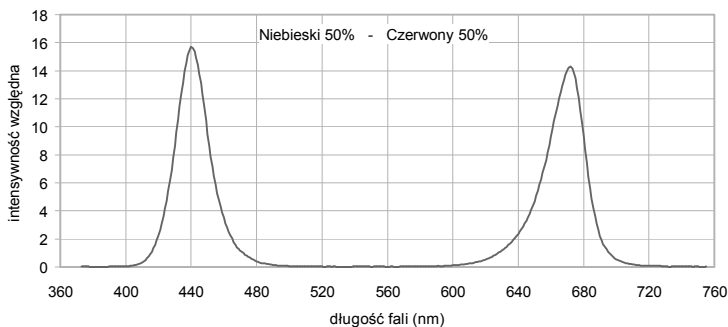
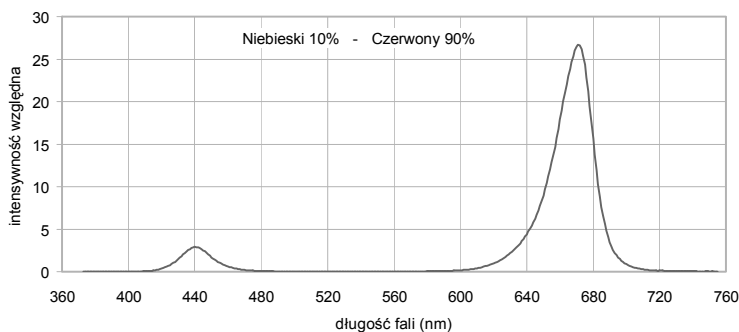
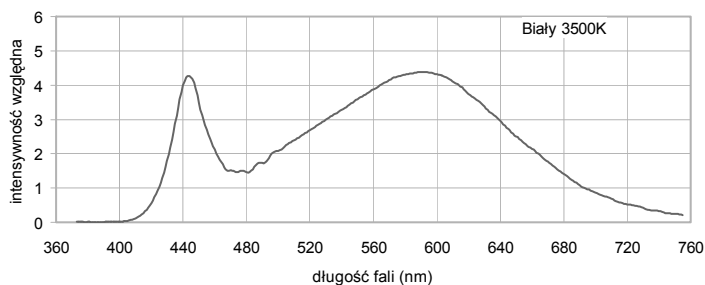
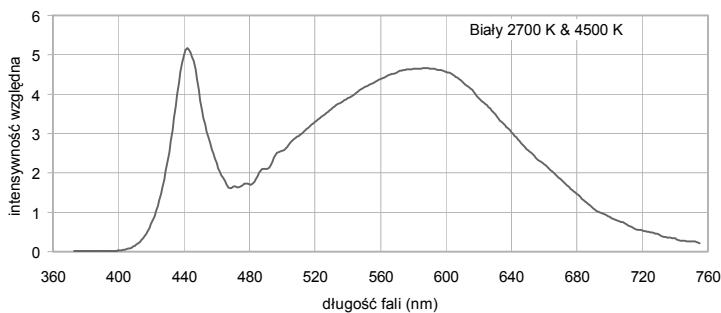
W lampach zainstalowanych na stanowisku nr 6 zastosowano modyfikację polegającą na zastąpieniu dwóch grup diod diodami białymi o temperaturze barwowej 2700 K i dwóch grup diodami białymi o temperaturze barwowej 4500 K. Charakterystykę spektralną światła emitowanego przez lampy na stanowisku 6. pokazano na rysunku 9.



Rys. 4. Charakterystyka spektralna lamp oświetlających stanowisko nr 1



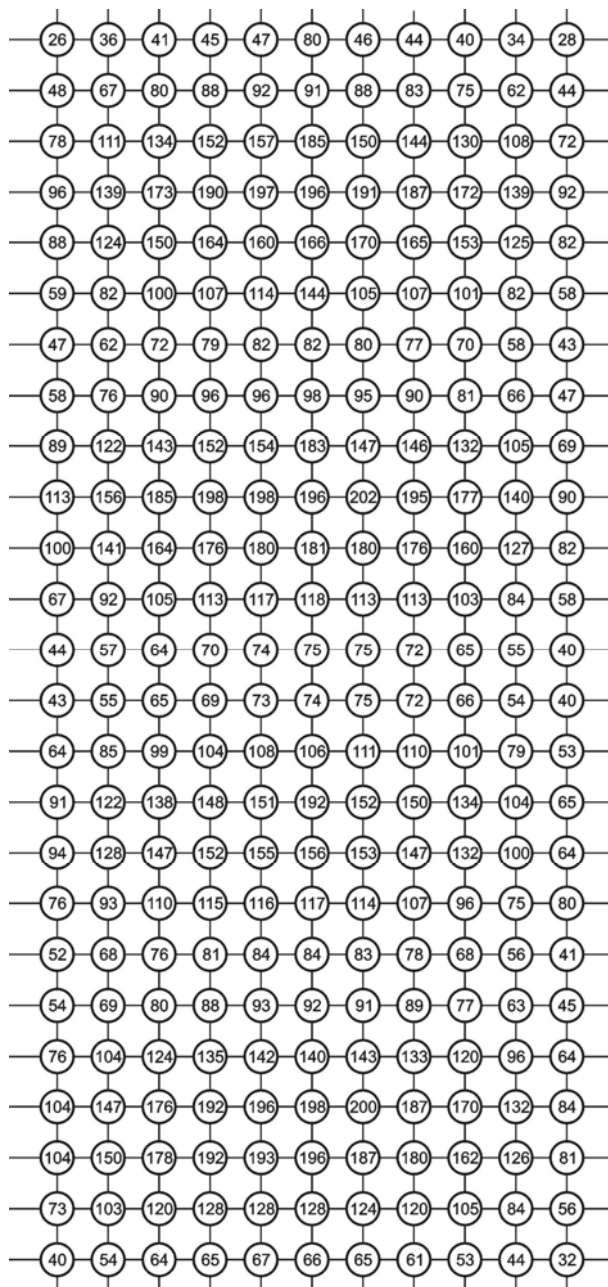
Rys. 5. Charakterystyka spektralna lamp oświetlających stanowisko nr 2

**Rys. 6. Charakterystyka spektralna lamp oświetlających stanowisko nr 3****Rys. 7. Charakterystyka spektralna lamp oświetlających stanowisko nr 4****Rys. 8. Charakterystyka spektralna lamp oświetlających stanowisko nr 5****Rys. 9. Charakterystyka spektralna lamp oświetlających stanowisko nr 6**

Na rysunku 10 przedstawiono przykładowe (stanowisko 2) wyniki pomiarów liczności fotonów w odległości 65 cm od źródła światła. Raster pomiaru wynosił 10 cm.

Przeprowadzone eksperymenty pozwalają na stwierdzenie, że zmniejszenie odległości między poszczególnymi lampami jednego stanowiska z 40 na 30 cm pozwalają na znaczną poprawę równomierności doświetlania.

Rys. 10. Pomiar liczności fotonów w odległości 65 cm od źródła światła. Raster pomiaru 10 cm



Na fotografii (rys. 11) pokazano widok praktycznej realizacji stanowisk badawczych w kamerze szklarni Wydziału Ogrodniczego Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie.

Pomiary charakterystyk spektralnych lamp LED przedstawione na rysunkach 4-9 zostały wykonane przez autorów przy pomocy spektrofotometru BTS256 firmy GIGAHERTZ OPTIK.

Do pomiarów liczności fotonów zastosowano miernik LI-250 wyposażony w sondę LI190 SA wyprodukowany przez specjalistyczną firmę LI-COR.

Zaprezentowane rozwiązanie zostało zgłoszone w Urzędzie Patentowym. Zgłoszenie patentowe nr P.397612 pt. „Oświetlacz roślin i sposób sterowania oświetlaczem” [17].



Rys. 11. Stanowiska badawcze w jednej z kamer szklarni Wydziału Ogrodniczego Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie

3. UWAGI KOŃCOWE

W trakcie realizacji zadań badawczych wykonywanych w ramach projektu finansowanego przez NCN, w szklarni Wydziału Ogrodniczego Uniwersytetu Rolniczego przeprowadzono cztery cykle uprawy rozspanki warzywniej (*Valerianella locusta*) 'Noordhollandse': dwa w sezonie jesiennym w latach 2012 i 2013 oraz dwa w sezonie zimowym 2012/13 i 2013/14. Doświetlanie uzupełniające prowadzono w cyklu: 16 h dzień/8 h noc, wykorzystując opisany powyżej system złożony z 24 lamp LED, w którym wyodrębniono sześć stanowisk różniących się składem spektralnym emitowanego światła. W siódmej kombinacji (kontrolnej) rośliny doświetlano wysokoprężną lampą sodową SON AGRO 600 W. Na każdym stanowisku obiektami badawczymi były rośliny rosnące tuż pod lampami, do których w czasie doświetlania uzupełniającego docierało natężenie napromieniowania wynoszące $180\text{--}200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. W trakcie uprawy, także podczas doświetlania roślin, monitorowano intensywność fotosyntezy i transpiracji, parametry fluorescencji chlorofilu oraz koncentrację barwników fotosyntetycznych. Oceniano również wskaźniki wartości biologicznej plonu, jak zawartość kwasu askorbinowego, cukrów rozpuszczalnych i azotanów oraz przeprowadzono analizę nakładów energetycznych uprawy. Uzyskane wyniki wykazały pełną przydatność zastosowanej technologii SSL LED do doświetlania roślin w uprawie szklarniowej. Ważnym parametrem z punktu widzenia producenta roślin jest ocena wielkości plonowania. Na podstawie średnich z czterech cykli uprawy można stwierdzić, że istotnie

najwyższe plony rozspanki uzyskano w kombinacjach LED: 30% niebieski + 70% czerwony oraz 10% niebieski + 90% czerwony. Plony te były średnio o około 16% wyższe od uzyskanych w obiekcie kontrolnym (lampy HPS) oraz w kombinacji LED 50% niebieski + 50% czerwony. Najmniej efektywne pod względem wielkości plonowania było doświetlanie roślin światłem LED białym. Zaobserwowano ponadto korzystny wpływ światła niebieskiego na zwiększanie intensywności fotosyntezy oraz poziomu kwasu askorbinowego (witaminy C) w liściach rozspanki. Szczegółowe wyniki dotyczące wzrostu roślin, oraz przebiegu procesów fizjologicznych nie są prezentowane w niniejszej pracy. Po zakończeniu upraw w szklarni, obecnie w trakcie realizacji są analizy chemiczne prowadzone na głęboko zamrożonym materiale roślinnym. Niemniej uzyskane jak dotąd wyniki pozwalają stwierdzić, że zastosowana w eksperymencie nowoczesna technologia SSL LED przyniosła wymierne korzyści, związane z wyprodukowaniem w okresie jesienno-zimowym wartościowego plonu przy równocześnie mniejszym zużyciu energii elektrycznej (w porównaniu z zastosowaniem wysokoprężnych lamp sodowych).

Podziękowania

Badania dotowane ze środków przyznanych przez Narodowe Centrum Nauki, grant nr 2011/01/B/NZ9/00058.

LITERATURA

1. Bula R.J., Morrow R.C., Tibbits T.W., Barta D.J., Ignatius R.W., Martin T.S., 1991. Light-emitting-diodes as a radiation source for plants. *HortScience* 26: 203-205.
2. Fan X.X., Xu Z.G., Liu X.Y., Tang C.M., Wang L.W., Han X.L., 2013. Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light. *Scientia Horticulturae* 153: 50-55.
3. Grzesiak W., Bieńkowski A., Żupnik M., Wojciechowska R., Kołton A., Kurpaska S., 2011. Nowoczesne systemy doświetlania roślin oparte o najnowsze osiągnięcia technologii SSL LED. *Elektronika* 6: 137-139.
4. Grzesiak W., Żupnik M., Wojciechowska R., 2012. Inteligentny system doświetlania roślin bazujący na technologii SSL LED. *Prace Instytutu Elektrotechniki*, z. 255: 259-276.
5. Jeong S.W., Hogewoning S.W., van Ieperen W., 2014. Responses of supplemental blue light on flowering and stem extension growth of cut chrysanthemum. *Scientia Horticulturae* 165: 69-74.
6. Jung E.S., Lee S., Lim S.H., Ha S.H., Liu K.H., Lee C.H., 2013. Metabolite profiling of the short-term responses of rice leaves cultivated under different LED lights and its correlations with antioxidant activities. *Plant Science* 210: 61-69.
7. Kłamkowski K., Treder W., Treder J., Puternicki A., Lisak E., 2012. Wpływ doświetlania lampami sodowymi i LED na aktywność fotosyntetyczną oraz wzrost roślin pomidora. *Prace Instytutu Elektrotechniki*, z. 256: 76-85.
8. Massa G.D., Kim H.H., Wheeler R.M., Mitchell C.A., 2008. Plant productivity in response to LED lighting in horticulture. *Hort Science* 43: 1951-1956.
9. Morrow R.C., 2008. LED lighting in Horticulture. *HortScience* 43(7): 1947-1950.

10. Samouliene G., Sirtautas R., Brazaityte A., Duchovskis P., 2012. LED lighting and seasonality effects antioxidant properties of baby leaf lettuce. *Food Chemistry* 134: 1494-1499.
11. Taiz L., Zeiger E., 2011. *Plant Physiology*. Sinauer Associated Inc.
12. Trouwborst G., Oosterkamp J., Hogewoning S.W., Harbinson J., van Ieperen W., 2010. The responses of light interception, photosynthesis and fruit yield of cucumber to LED lighting within the canopy. *Physiologia Plantarum* 138(3): 289-300.
13. Wojciechowska R., Kołton A., Długosz-Grochowska O., Żupnik M., Grzesiak W., 2013. The effect of LED lighting on photosynthetic parameters and weight of lamb's lettuce (*Valerianella locusta*). *Folia Horticulturae* 25(1): 41-47.
14. Wright M., 2011. Precise LED wavelengths spur plant growth. *LEDsmagazine.com*, April/May 2011.
15. Żupnik M., Grzesiak W., Wojciechowska R., Kurpaska S., 2012. Programowalny system doświetlania roślin zbudowany w oparciu o technologię SSL LED. *Inżynieria Rolnicza* 2(136) T 1: 361-369.
16. ANSI E1.11 – USITT DMX512-A: Asynchronous Serial Digital Data Transmission Standard for Controlling Lighting Equipment and Accessories.
17. Zgłoszenie patentowe nr P.397612 pt. “Oświetlacz roślin i sposób sterowania oświetlaczem”.

Rękopis dostarczono dnia 16.04.2014 r.

PRACTICAL IMPLEMENTATION OF THE
PROGRAMMABLE PLANT IRRADIATION SYSTEM,
WITH MULTIPLE RESEARCH STATIONS,
BASED ON SSL LED TECHNOLOGY

Wojciech GRZESIAK
Marek ŻUPNIK
Renata WOJCIECHOWSKA

ABSTRACT *This article presents the practical implementation of the six research stations system for plant supplemental lighting, based on the latest SSL LED technology. The system has been designed and made for the purposes of the research project no 2011/01/B/NZ9/00058, funded by the National Science Centre (2011-2014) and conducted at the Department of Horticulture, Agricultural University of Krakow. The presented system consists of 24 LED lamps illuminating six research units. Each of the units, whose technical parameters can be independently controlled and programmed, is equipped with four LED lamps of the same spectral characteristics.*

The article presents the structure of the system, the possibility of its programming, spectral lamps characteristics and a sample map of illuminance distribution.

Preliminary evaluation of the usefulness of the presented SSL LED system for improvement of the lamb's lettuce yielding and its physiological or pro-healthy properties was also discussed.

Keywords: *SSL LED technology, light emitting diode, plants irradiation, luminaire, control system, control algorithm*

Dr inż. Wojciech GRZESIAK w roku 1973 ukończył studia wyższe na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej i uzyskał tytuł zawodowy magistra inżyniera fizyki. W roku 2009 w Instytucie Technologii Elektronowej w Warszawie obronił pracę doktorską pt. "Implementacja algorytmów wyszukiwania punktu mocy maksymalnej w regulatorach ładowania autonomicznych systemów fotowoltaicznych" i uzyskał stopień naukowy doktora nauk technicznych w dyscyplinie elektronika. Pracuje w Krakowskim Oddziale Instytutu Technologii Elektronowej na stanowisku Adiunkta – Kierownika Pracowni Elektroniki.



Jest autorem i współautorem 162 publikacji krajowych i zagranicznych, kierownikiem lub głównym wykonawcą 12 projektów naukowo-badawczych oraz współautorem kilkunastu patentów. Specjalizuje się w zakresie technologii i konstrukcji mikroelektronicznych układów grubowarstwowych, serwisie i budowie aparatury pomiarowej, technologii rezystorów specjalnych, a przez ostatnie dziewięć lat w tematyce związanej fotowoltaiką oraz zastosowaniami technologii SSL LED.



Mgr inż. Marek ŻUPNIK w roku 1981 ukończył studia wyższe na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie i uzyskał tytuł magistra inżyniera elektronika. W latach 1981-1992 pracował w Instytucie Fizyki Jądrowej w Krakowie oraz w Kernforschungsanlage Jülich. Od roku 1991 jest współwłaścicielem firmy PXM, która zajmuje się projektowaniem i produkcją systemów sterowania oświetleniem oraz stosowaniem technologii SSL LED.

Dr hab. inż. Renata WOJCIECHOWSKA ukończyła studia na Wydziale Ogrodniczym Uniwersytetu Rolniczego w 1983 roku. Następnie rozpoczęła pracę na ww. wydziale. Stopień naukowy doktora nauk rolniczych uzyskała w 1999 roku, a stopień doktora habilitowanego nauk rolniczych w zakresie ogrodnictwa – fizjologii roślin – w roku 2004. Obecnie jest adiunktem w Katedrze Botaniki i Fizjologii Roślin Wydziału Ogrodniczego UR w Krakowie. W swoich badaniach zajmuje się wpływem czynników modyfikujących wartość biologiczną plonu roślin ogrodniczych, ze szczególnym uwzględnieniem metabolizmu azotanów. Interesuje się także produktywnością fotosyntetyczną oraz parametrami aktywności antyoksydacyjnej roślin. Od niedawna podjęła się badań z zakresu wpływu doświetlania roślin diodami elektroluminescencyjnymi. Jest autorką/współautorką 70 oryginalnych publikacji naukowych.



