

Wojciech GRZESIAK  
Marek ŻUPNIK  
Renata WOJCIECHOWSKA

## INTELIGENTNY SYSTEM DOŚWIETLANIA ROŚLIN BAZUJĄCY NA TECHNOLOGII SSL LED

**STRESZCZENIE** *Dynamiczny rozwój technologii SSL LED (Solid-State Lighting Light-Emitting Diode) spowodował, że stosowane dotychczas lampy sodowe i fluorescencyjne są i będą coraz częściej wypierane przez źródła światła na niej oparte. W artykule zaprezentowano kompletny system przeznaczony do doświetlania roślin, w tym również upraw, metodą in vitro. Omówiono wybrane zagadnienia związane z konstrukcją opraw oświetleniowych oraz z inteligentnym systemem ich sterowania, umożliwiającym implementację zaawansowanych algorytmów doświetlania.*

*Przeanalizowano możliwości i aspekty ekonomiczne zasilania systemu z hybrydowej instalacji fotowoltaicznej.*

**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

**mgr inż. Marek ŻUPNIK**  
e-mail: marek@pxm.pl

Firma PXM w Krakowie

**dr hab. inż. Renata WOJCIECHOWSKA**  
e-mail: rwojciechowska@ogr.ur.krakow.pl

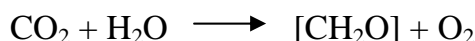
Wydział Ogrodniczy, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 255, 2012

## 1. WSTĘP

---

Rosnące koszty energii i troska o stan środowiska naturalnego skłaniają do ciągłych poszukiwań nowych, energooszczędnych technologii, także w ogrodnictwie. Dlaczego jest to ważne? Otóż rośliny zielone posiadają unikalną zdolność zamiany energii świetlnej w chemiczną. Proces ten można wyrazić uproszczonym równaniem fotosyntezy, zaznaczając, że przebiega w chloroplastach z wykorzystaniem energii kwantów światła (energia pojedynczego kwantu promieniowania, czyli fotonu według teorii Plancka, jest iloczynem częstotliwości światła i stałej Plancka, zgodnie z równaniem  $E = h\nu$ ):



(w nawiasie kwadratowym zaznaczono w uproszczony sposób węglowodany).

Proces ten jest bardzo złożony, wieloetapowy z rozdziałem przestrzennym i czasowym w poszczególnych fazach. Rozpoczyna go faza świetlna (jasna). Zgodnie z prawami fotochemii, kwanty promieniowania świetlnego muszą zostać zaabsorbowane przez specyficzne receptory, którymi w przypadku roślin lądowych są chlorofil *a* i *b* oraz karotenoidy (karoteny i ksantofile). Po zaabsorbowaniu fotonu w zakresie światła fotosyntetycznie czynnego (ang. *photosynthetically active radiation*; PAR), wzbudzony barwnik na drodze rezonansu przekazuje energię wzbudzenia sąsiedniej cząsteczce chlorofilu.

W antenach energetycznych poszczególnych kompleksów chlorofilowo-karotenoidowych może występować nawet kilka tysięcy cząsteczek barwników, kierujących energię wzbudzenia do centrum reakcji fotosyntetycznej (PS), w którym znajduje się para chlorofili *a*. Istotą fazy jasnej fotosyntezy jest wzbudzenie elektronu z chlorofilu w centrum PS, przekazanie go na przejściowy akceptor, a następnie transport elektronu przez szereg przENOŚNIKÓW, w wyniku czego niektóre związki organiczne uzyskują wyższy poziom energetyczny. Związki te nazywane siłą asymilacyjną są niezbędne do przebiegu dalszych etapów fotosyntezy, niezależnych już od obecności światła.

Przedstawiony powyżej skrócony opis reakcji fotochemicznych wskazuje na niezbędny udział promieniowania fotosyntetycznie czynnego w fazie świetlnej fotosyntezy. Terminem PAR określa się najczęściej promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie długości fal od 400 do 700 nm. Widmo czynnościowe (funkcyjne) fotosyntezy oraz widma absorpcyjne barwników fotosyntetycznych dowodzą bezsprzecznie niezbędności światła niebieskiego i czerwonego we

wzbudzeniu cząsteczek anteny wielobarwnikowej poszczególnych systemów fotosyntetycznych (maksima w zakresach odpowiednio 430-450 nm oraz 640-660 nm). Warto w tym miejscu podkreślić, że chlorofile obecne w samych centrach reakcji fotosyntetycznych maksimum absorpcji wykazują w zakresie światła czerwonego (680 nm i 700 nm, w zależności od rodzaju fotoukładu PS).

Oprócz długości fali świetlnej istotne znaczenie w odpowiednim przebiegu fotosyntezy ma gęstość strumienia kwantów (fotonów PAR), czyli liczba fotonów przypadająca na jednostkę powierzchni w jednostce czasu.

Przy niewielkiej gęstości strumienia fotonów (w zakresie kilku do kilkunastu  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) następuje kompensacja pobierania dwutlenku węgla w fotosyntezie z wydzielaniem tego gazu podczas oddychania. Te niskie wartości nazywane są świetlnym punktem kompensacyjnym, w którym zrównoważenie procesów fotosyntezy z oddychaniem skutkuje zahamowaniem procesu wzrostu roślin. Zwiększenie ilości fotonów do kilkuset  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (w zależności od gatunku i wymagań świetlnych rośliny) wpływa na wzrost intensywności fotosyntezy do wartości maksymalnych, pozwalających uzyskać największą produktywność fotosyntetyczną.

Dokładniejsze opisy i ilustracje opisanych powyżej zależności (schematy, wykresy) można znaleźć w wielu źródłach podręcznikowych i naukowych z zakresu fizjologii roślin [10, 12, 20]. Niektóre dane z tej dziedziny wiedzy zostały przytoczone w pozycji literaturowej [15]. Ponadto na rysunkach 5 i 6 przedstawiono charakterystyczne dla większości roślin, krzywe absorpcji chlorofilu *a* i chlorofilu *b*.

Reasumując, do optymalnego przebiegu procesu fotosyntezy niezbędne są zarówno odpowiednie właściwości spektralne źródła światła, jak i natężenie emitowanego napromieniowania w zakresie PAR. Biorąc pod uwagę warunki klimatyczne strefy umiarkowanej i borealnej, ludzie od lat poszukują i doskonalą sztuczne źródła światła, które mogłyby służyć do doświetlania asymilacyjnego (fotosyntetycznego) upraw ogrodnich pod osłonami, zwłaszcza w okresie jesienno-zimowym. Obecnie stosuje się najczęściej wysokoprężne lampy sodowe (HPS) o wysokiej skuteczności świetlnej, w następnej kolejności niskoprężne lampy sodowe, lampy fluorescencyjne lub rtęciowe [13, 14, 16]. Jednak z uwagi na wysokie koszty zużycia energii, wciąż poszukuje się źródeł tańszych, emitujących jednocześnie światło o najkorzystniejszej dla roślin barwie. Analizując rozwój diod typu LED [15] pod względem coraz lepszych parametrów technicznych przy równoczesnym obniżaniu się cen jednostkowych oraz biorąc po uwagę możliwości zapewnienia roślinom światła o odpowiedniej charakterystyce widmowej, można przewidywać, że systemy oparte na technologii SSL LED wkrótce staną się istotnym alternatywnym sposobem doświetlania roślin ogrodnich na skalę produkcyjną. Zaawansowane badania w tej dziedzinie prowadzi się w wielu ośrodkach na świecie. Na przykład naukowcy z Uniwersytetu w Purdue uzyskali ostatnio grant w wysokości około 5 milionów dolarów na badania

z zakresu doświetlania międzyrzędowego (interlighting) upraw szklarniowych z zastosowaniem technologii wykorzystującej światło LED [21]. Bardzo szybko technologie LED do doświetlania roślin rozwijają się w Japonii. W Europie wiodące ośrodki badawcze znajdują się m.in. w Finlandii, Holandii, na Litwie.

Tematyka ta była również realizowana w naszym kraju w latach 2007-2009 w ramach projektu badawczo rozwojowego nr R02 049 02 – „Innowacyjny system programowanego doświetlania roślin ogrodnich diodami elektroluminescencyjnymi zasilanymi z autonomicznej instalacji fotowoltaicznej”, realizowanego przez Instytut Technologii Elektronowej oraz Instytut Fizjologii Roślin Polskiej Akademii Nauk Krakowie [2-9].

Również obecnie prowadzone są w tym zakresie badania przez Instytut Elektrotechniki w Warszawie we współpracy z SGGW [15]

O aktualności tematu świadczy także rozpoczęcie w bieżącym roku badań finansowanych przez Narodowe Centrum Nauki, związanych z fizjologicznymi i prozdrowotnymi parametrami roszonej w uprawie szklarniowej z zastosowaniem w doświetlaniu uzupełniającym najnowszych osiągnięć technologii SSL LED. Autorami i wykonawcami projektu są między innymi współautorzy niniejszego artykułu. Eksperyment będzie prowadzony w nowoczesnej szklarni należącej do Wydziału Ogrodniczego Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, z wykorzystaniem systemu zaprezentowanego w artykule. Warto podkreślić, że na świecie wciąż niewiele jest badań nad wpływem światła LED na procesy fizjologiczne roślin, prowadzące do wytworzenia plonu o odpowiedniej wielkości i wartości biologicznej. Interesująca będzie także ekonomiczna ocena kosztów takiej uprawy.

Do niedawna, ze względu właśnie na koszty diod, najwięcej badań prowadzono na mniejszą skalę, w kulturach *in vitro* oraz komorach fitotronowych. Korzystny wpływ światła LED niebieskiego i jednocześnie czerwonego wykazano na przykład w kulturach *in vitro* chryzantem [11] oraz storczyków [18]. W badaniach tego typu autorzy najczęściej obserwują zwiększoną zawartość barwników asymilacyjnych oraz większą intensywność fotosyntezy w porównaniu do roślin kontrolnych, rosnących na przykład pod świetłówkami. Ponieważ Polska należy do czołowych producentów mikrosadzonek roślin ozdobnych w Europie, zarówno na rynek krajowy jak i na eksport, warto wykorzystywać półprzewodnikowe źródła światła również w laboratoriach kultur tkankowych w naszym kraju. Korzyści wiążą się także z lepszą zdolnością aklimatyzacji traktowanych LED-ami sadzonek w uprawie *ex vitro*, po wysadzeniu do szklarni. Dużym problemem dla producentów sadzonek jest przegrzewanie się roślin pod wpływem doświetlania lampami sodowymi. Z tych i innych powodów badania nad zastosowaniem najnowszych osiągnięć technologii LED we wspomaganie wzrostu i rozwoju roślin wychodzi naprzeciw bardzo aktualnym potrzebom.

Oprócz niezbędnego udziału światła w fotosyntezie, pełni ono również kluczową rolę w zjawiskach fotomorfogenezy roślin [17, 19], wpływając w dużym

stopniu na wartość biologiczną uzyskiwanego plonu [22]. Fotomorfogenezę można określić jako niezależny od fotosyntezy wpływ światła na wzrost i rozwój roślin (wzrost wydłużeniowy pędu, rozwój liści, indukcja kwitnienia). Zakres oddziaływania jest tu większy, gdyż efekty morfogenetyczne wywołuje oprócz światła niebieskiego i czerwonego, także światło fioletowo-niebieskie (370 nm) oraz dalekiej czerwieni (730 nm). Fotoreceptorami roślinnymi odpowiedzialnymi za zjawiska rozwojowe są kryptochromy i fitochromy, barwniki uczestniczące w absorpcji i transdukcji sygnałów świetlnych. Warto zaznaczyć, że w wywołaniu zjawisk fotomorfogenetycznych priorytetowe znaczenie ma długość fali świetlnej, a nie natężenie napromieniowania. Efekty rozwojowe indukowane są tu przy niewielkiej gęstości strumienia fotonów – wielokrotnie niższej niż w przypadku natężeń napromieniowania, wymaganych do osiągnięcia stanu wysycenia fotosyntezy. Zastosowanie zaprezentowanej technologii SSL LED umożliwia precyzyjne ustawienie zakresu widma spektralnego, dając szerokie możliwości dostosowania go do potrzeb danego gatunku. Duże oczekiwania wiązane są tu z możliwościami sterowania na przykład szybkością wzrostu pędu oraz pobudzaniem roślin do kwitnienia w procesie indukcji foto-periodycznej. Badania realizowane z wykorzystaniem systemu opisanego wcześniej [9] wskazują na jego przydatność nie tylko w stymulowaniu procesu fotosyntezy roszponki, ale także w wywołaniu zjawisk morfogenetycznych, takich jak pobudzanie kwitnienia begonii (dane jeszcze niepublikowane).

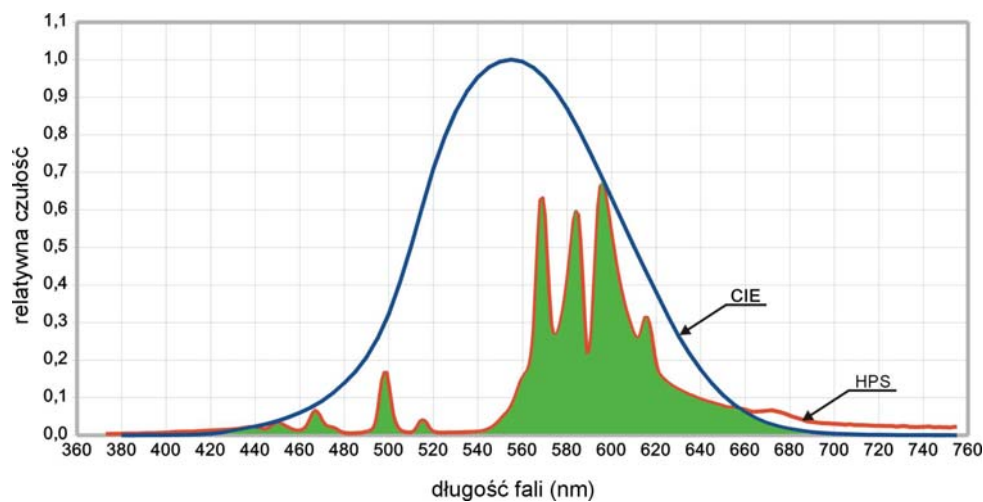
Badania nad ciągłym udoskonalaniem technologii SSL LED do doświetlania roślin użytkowych znajdują w pełni ekonomiczne i środowiskowe uzasadnienie, niezależnie od sposobu wykorzystania – w kulturach *in vitro*, *ex vitro*, w komorach fitotronowych, uprawach szklarniowych lub też we wnętrzach domów prywatnych i pomieszczeniach użyteczności publicznej.

## 2. WYBRANE ZAGADNIENIA POMIAROWE

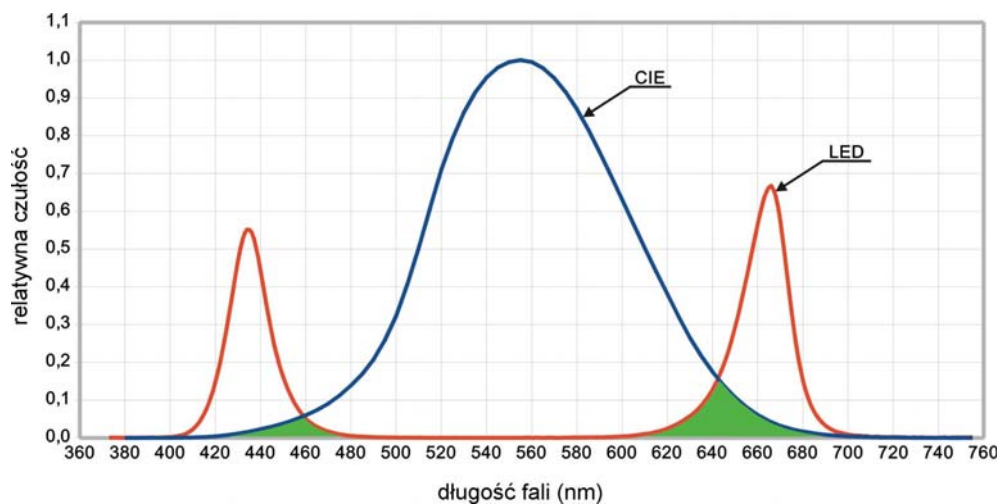
---

Najbardziej znanym i rozpowszechnionym przyrządem służącym do oceny intensywności oświetlenia jest luksomierz. W latach sześćdziesiątych, siedemdziesiątych ubiegłego stulecia stosowano go powszechnie do oceny natężenia oświetlenia także w uprawach ogrodniczych. Ze względu na swoją charakterystykę czułości zgodną z normą CIE 1931, zdefiniowaną przez International Commission on Illumination (skrót pochodzi z francuskiej nazwy komisji: Commission internationale de l'éclairage), przyrząd ten może być stosowany wyłącznie do pomiarów, w których istotny jest odbiór wzrokowy. Nie powinien być natomiast stosowany do oceny intensywności światła w doświetlaniu roślin, które absorbują promieniowanie świetlne w innych niż odbierane przez czło-

wieka zakresach częstotliwości. Wprawdzie w przypadku stosowanych do tej pory do doświetlania upraw wysokoprężnych lamp HPS (*High Pressure Sodium*), których charakterystyka spektralna mieści się w zakresie pomiarowym lukso-  
mierza, taki przyrząd dla celów porównawczych mógł być stosowany (rys. 1), to jednak w przypadku pomiaru lamp bazujących na technologii SSL LED nie jest to już możliwe. Wynika to z faktu, że tym przypadku prawie cały zakres emisji światła lampy LED znajduje się poza obszarem pomiarowym lukso-  
mierza (rys. 2). W wyniku tak wykonanego pomiaru uwzględnione zostaną jedynie zaznaczone na rysunku 2 na zielono obszary, a więc uzyskane wartości będą całkowicie fałszywe.

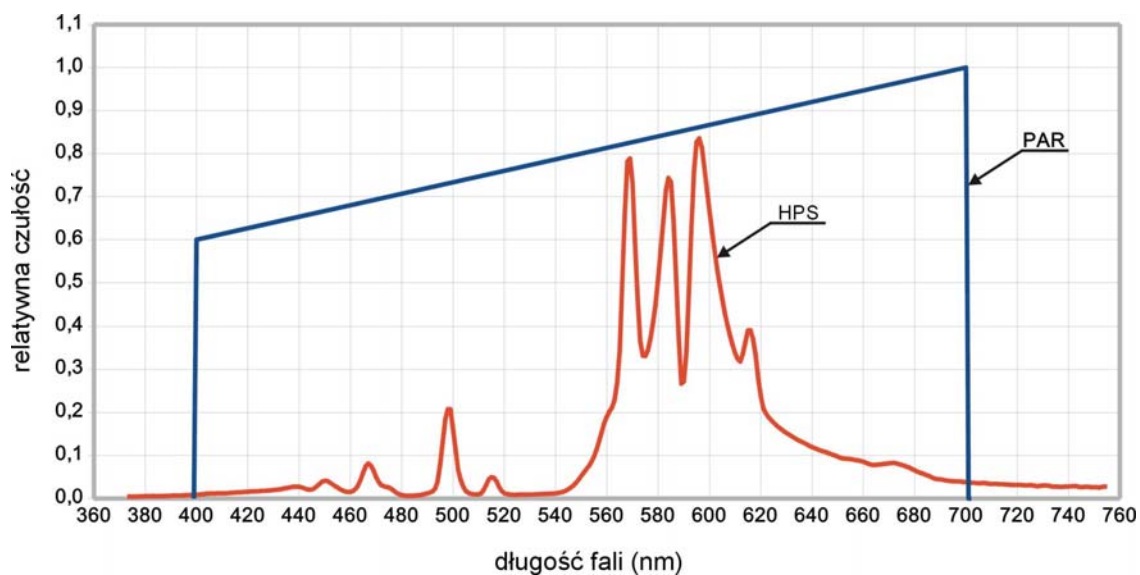


**Rys. 1.** Charakterystyka spektralna widma emisyjnego lampy HPS i krzywa czułości widmowej oka w warunkach światła dziennego według CIE

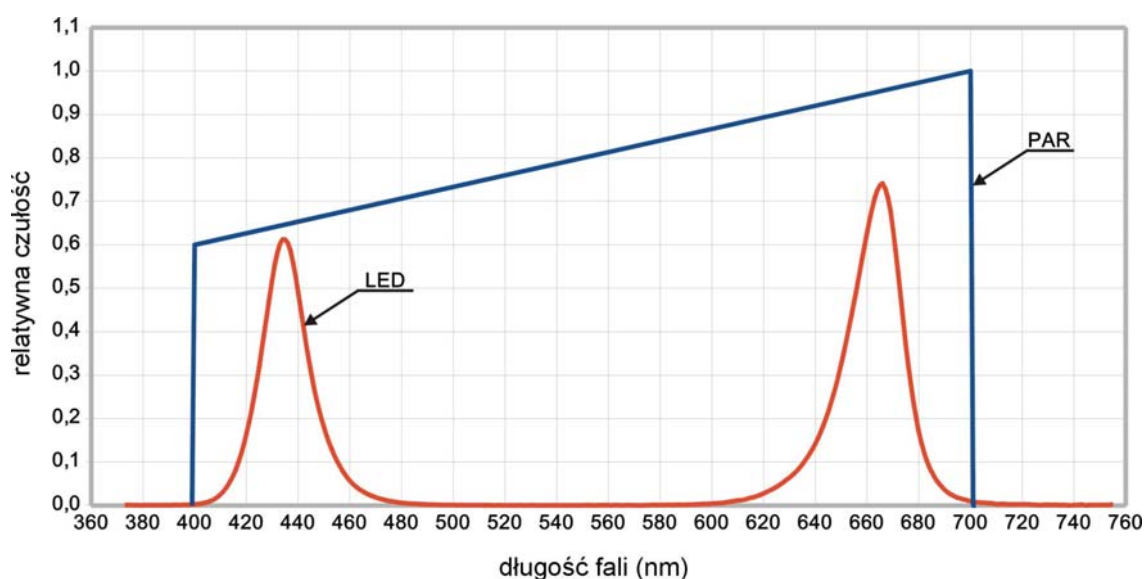


**Rys. 2.** Charakterystyka spektralna widma emisyjnego lampy LED i krzywa czułości widmowej oka w warunkach światła dziennego według CIE

Przyrządem najczęściej stosowanym i właściwym do pomiarów źródeł światła stosowanych w doświetlaniu roślin jest miernik PAR (Photosynthetically Active Radiation). Posiada on zupełnie inną charakterystykę, która uwzględnia zarówno pomiar światła emitowanego przez źródła światła HPS (rys. 3) jak i LED (rys. 4).

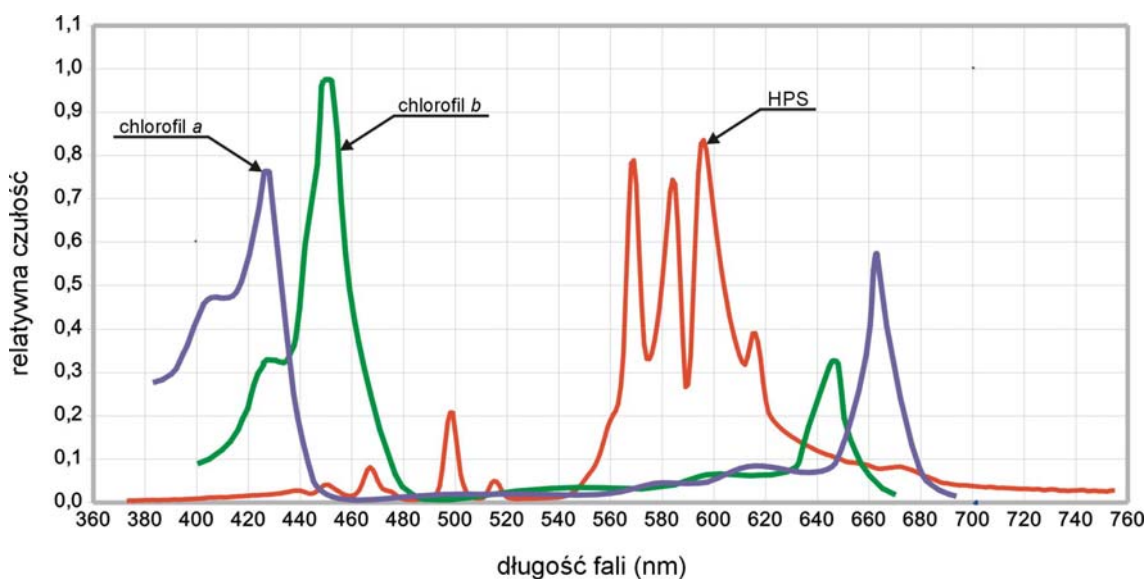


Rys. 3. Charakterystyka spektralna widma emisyjnego lampy HPS oraz fragment prostej fotonowej w umownie przyjmowanym zakresie widma PAR

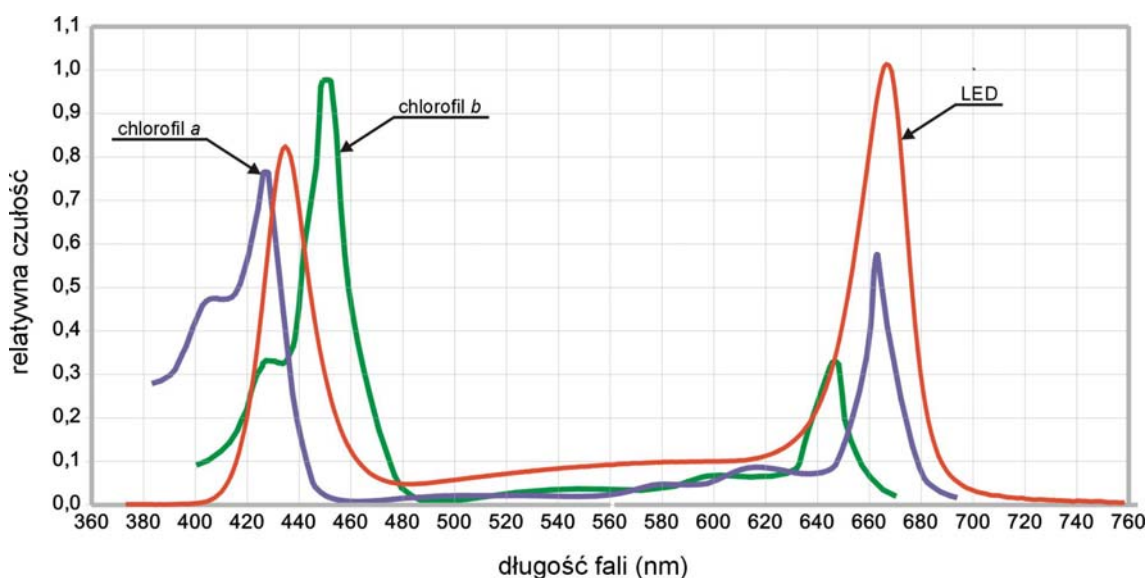


Rys. 4. Charakterystyka spektralna widma emisyjnego lampy LED oraz fragment prostej fotonowej w umownie przyjmowanym zakresie widma PAR

Pomimo to, przyrzędem PAR można porównywać wyłącznie lampy bazujące na takiej samej technologii. Pomiar parametrów lampy HPS oraz lampy LED i próba ich porównania pod kątem przydatności do doświetlania roślin wygeneruje fałszywy rezultat. Wynika to z zupełnie różnego rozkładu charakterystyki widmowej emitowanego światła badanych lamp. Energia emitowanego światła przez przedstawione na rysunkach 5 i 6 lampy HPS i LED jest podobna, ale w przypadku lampy HPS większa jej część leży poza obszarem absorpcji



Rys. 5. Charakterystyka spektralna widma emisyjnego lampy HPS oraz krzywe absorpcji chlorofilu a i chlorofilu b



Rys. 6. Charakterystyka spektralna widma emisyjnego lampy LED oraz krzywe absorpcji chlorofilu a i chlorofilu b



rośliny (rys. 5). Natomiast w przypadku lampy LED prawie cała energia emitowanego światła mieści się w tym obszarze (rys. 6). W obu przypadkach pomiar wykonany przyrządem PAR wykaże podobny wynik, natomiast rzeczywisty efekt fotosyntezy uzyskany przy zastosowaniu lampy HPS będzie gorszy niż uzyskany przy zastosowaniu lampy LED.

Wprawdzie od kilku lat prowadzone są intensywne badania nad skutecznością doświetlania roślin za pomocą diod LED, to jednak ciągle jeszcze wiele pytań pozostaje bez odpowiedzi. Szczególnie interesujący jest wpływ na fotosyntezę proporcji światła niebieskiego i czerwonego na różnych etapach rozwoju roślin, stosowanie oświetlenia impulsowego, wprowadzenie dodatkowego światła białego i ewentualny wpływ temperatury barwowej światła białego na fotosyntezę czy wreszcie znaczenie koloru zielonego dla rozwoju rośliny.

Odpowiedź na te pytania mogą przynieść jedynie badania naukowe prowadzone przy użyciu odpowiedniej aparatury. Dlatego też na potrzeby takich właśnie eksperymentów został zaprojektowany i zbudowany całkowicie innowacyjny system doświetlania roślin lampami LED, który charakteryzuje się przede wszystkim możliwością bardzo szerokiej parametryzacji emitowanego światła w zakresie poziomów udziału poszczególnych składowych oraz dowolnego definiowania zależności czasowych funkcjonowania poszczególnych lamp.

### 3. OPIS SYSTEMU

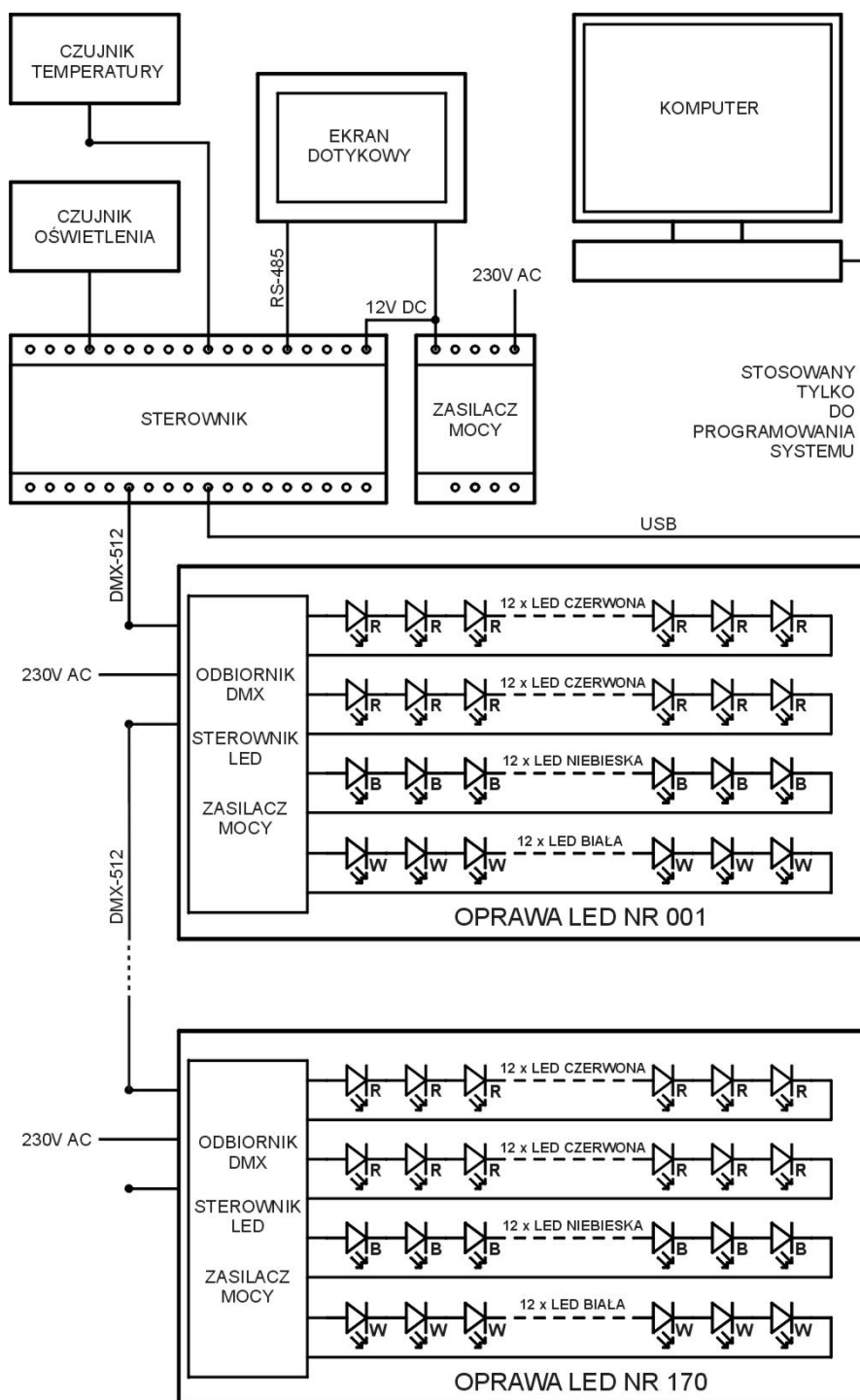
---

System składa się części sterującej i podłączonego do niej szeregu lamp (rys. 7). Rola zaznaczonego na rysunku komputera ogranicza się wyłącznie do ustawienia parametrów pracy systemu. Po jego odłączeniu zarządzanie całością przejmuje dedykowany sterownik (rys. 8), dzięki czemu system funkcjonuje całkowicie niezależnie według przygotowanego wcześniej algorytmu.

System umożliwia 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. Jeden sterownik może zarządzać 170 grupami lamp (jedną grupę stanowią lampy emitujące światło o takiej samej charakterystyce spektralnej w tym samym czasie).

Zaimplementowane oprogramowanie pozwala w pełni zautomatyzować proces doświetlania, poprzez między innymi zdefiniowanie godzin załączania i wyłączania lamp lub powiązanie tych funkcji ze wschodami i zachodami słońca. W tym przypadku wystarczy podanie długości i szerokości geograficznej miejsca instalacji oraz ewentualnego opóźnienia lub przyspieszenia reakcji systemu. Proces sterowania doświetlaniem odbywa się całkowicie płynnie. Czas załączania

i wyłączenia każdej lampy może być definiowany w zakresie od 0,1 sekundy do 1,5 godziny. Ilość załączeń i wyłączeń w ciągu doby oraz czas doświetlania są praktycznie nieograniczone. Możliwe jest również stosowanie oświetlenia impulsowego o długości trwania błysku od 0,1 sekundy i czasie przerwy pomiędzy błyskami do ponad godziny.



Rys. 7. Schemat blokowy systemu



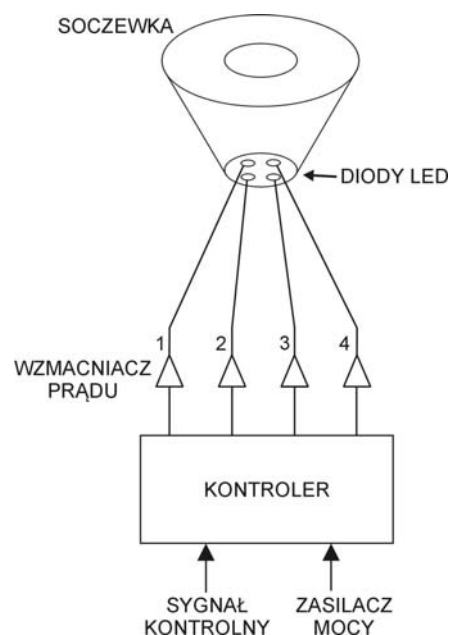
Rys. 8. Sterownik systemu

Zastosowany system umożliwia podłączenie również innych urządzeń zewnętrznych, jak np. czujników światła dziennego. Dzięki temu można niezależnie od zaprogramowanych czasów, automatycznie włączyć doświetlanie w wyjątkowo pochmurny dzień lub też zrezygnować z doświetlania podczas wyjątkowo jasnego popołudnia. Jest to funkcja niezwykle istotna w aspekcie oszczędności energii elektrycznej i efektywności doświetlania. Podobnie dzięki możliwości podłączenia czujnika temperatury, można programowo uzależnić algorytm sterowania doświetleniem od temperatury zewnętrznej. Do bezpośredniego zarządzania systemem można wykorzystać dotykowy panel LCD.

Modułowa konstrukcja systemu pozwala na łatwą jego instalację w typowych obudowach rozdzielni elektrycznych o odpowiedniej klasie szczelności (w przypadku upraw szklarniowych jest to IP65).

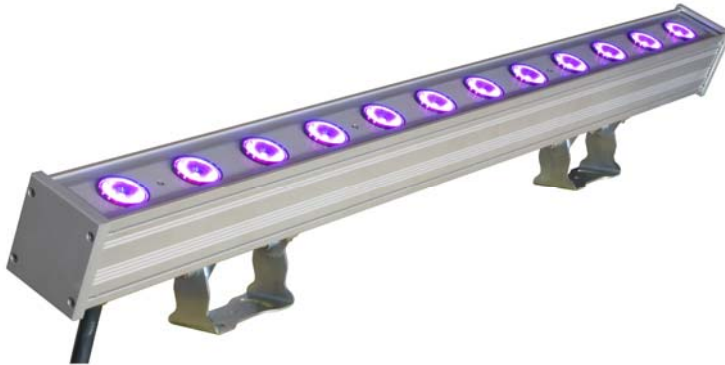
Sterowanie lampami odbywa się za pomocą protokołu cyfrowego DMX-512 [1], zdefiniowanego przez USITT (United States Institute for Theatre Technology). Jest on obecnie najlepszym i powszechnie stosowanym protokołem sterowania oświetleniem.

Każda z lamp (rys. 10.) zawiera 12 soczewek, pod którymi umieszczone są diody LED w ilości 4 sztuk pod każdą soczewką (rys. 9.). W omawianym wykonaniu są to diody: niebieska, biała neutralna i dwie czerwone, ale na potrzeby



Rys. 9. Schemat blokowy oprawy LED

eksperymentu można zastosować diody LED o innych barwach. Wszystkie diody jednego koloru w jednej lampie są wspólnie sterowane. Dzięki takiemu rozwiązaniu docierająca do rośliny wiązka światła jest bardzo dobrze zmieszana i zapewnia oświetlenie każdej jej części taką samą długością fal.



Rys. 10. Wygląd zewnętrzny oprawy LED

Ze względu na konieczność ograniczenia mocy całej lampy przy jednoczesnym maksymalnym wykorzystaniu energii każdej barwy układ mikroprocesorowy sterujący lampą realizuje algorytm sterowania według następującego wzoru:

$$P_x = P_{MAXx} D_x, \quad \text{dla} \quad \sum_{n=1}^k P_{MAXn} D_n \leq P_{TOT}$$

lub

$$P_x = \frac{P_{TOT}}{\sum_{n=1}^k P_{MAXn} D_n} P_{MAXx} D_x, \quad \text{dla} \quad \sum_{n=1}^k P_{MAXn} D_n > P_{TOT}$$

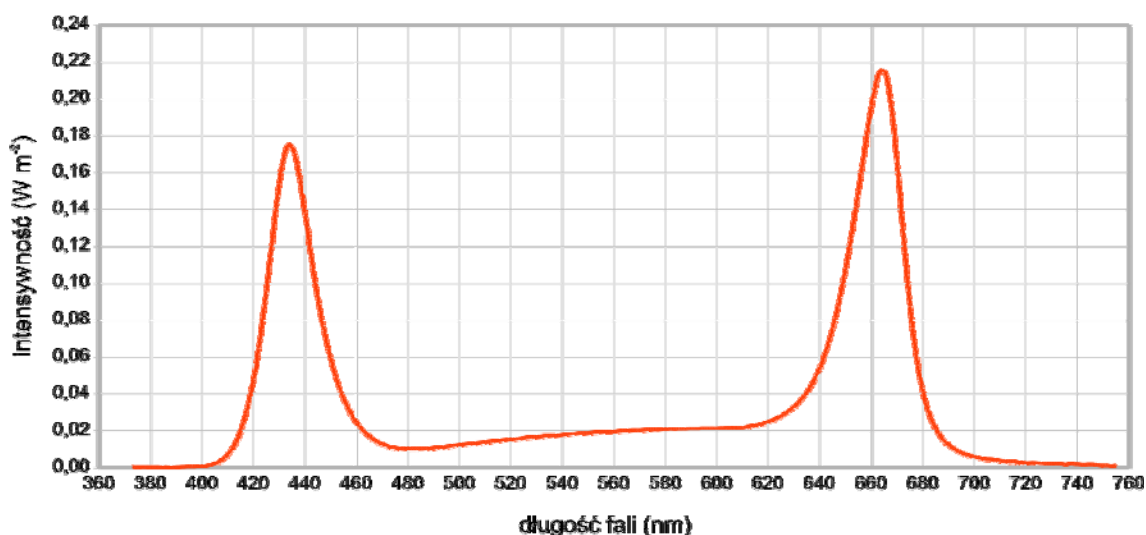
gdzie:

- $k$  – liczba diod pod jednym elementem optycznym;
- $k$  – jest większe lub równe 2;
- $x$  – numer diody pod elementem optycznym;
- $D_x$  – sygnał sterujący diodą „ $x$ ”;
- $D_x$  – może przyjmować wartości od 0 do 1;
- $P_{TOT}$  – maksymalna moc jednego elementu optycznego wyrażona w jednostkach Wat;
- $P_{MAXx}$  – maksymalna moc diody „ $x$ ” wyrażona w jednostkach Wat;
- $P_x$  – moc wysterylowanej sygnałem  $D_x$  diody „ $x$ ” wyrażona w jednostkach Wat.

W obecnym wykonaniu lampa może emitować światło:

- czerwone o długości fali 665 nm;
- niebieski o długości fali 435 nm;
- białe o temperaturze barwowej 4500 K i CRI > 80.

Proporcje poszczególnych składowych mogą być podczas procesu doświetlania dowolnie zmieniane. Na rysunku 11 przedstawiono przykładowe widmo emitowanego światła całej lampy dla sterowania: 100% światło białe i po 50% światło niebieskie i czerwone.



Rys. 11. Przykładowa charakterystyka spektralna widma emisyjnego opisanej powyżej oprawy LED, zmierzona w punkcie centralnym w odległości 1 m od jej powierzchni

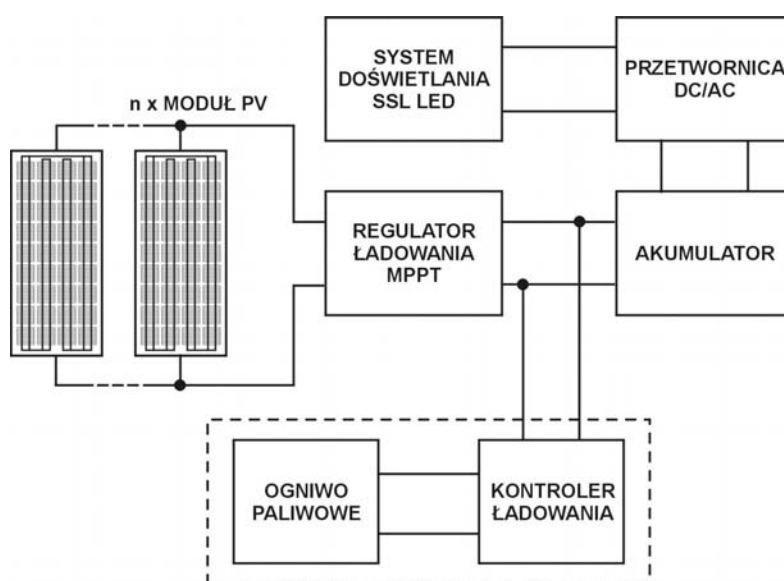
Dzięki zastosowaniu dedykowanej obudowy liniowej [23] o wymiarach 70 x 80 x 1000 mm lampa w niewielkim stopniu przesłania światło słoneczne. Obudowa wykonana w klasie szczelności IP65 pozwala na instalowanie lampy w bardzo wilgotnym środowisku. Maksymalny pobór mocy pojedynczej lampy nie przekracza 60 VA, dzięki czemu lampa nagrzewa się tylko o 20 stopni powyżej temperatury otoczenia.

#### 4. OPCJA ZASILANIA SYSTEMU Z AUTONOMICZNEJ HYBRYDOWEJ INSTALACJI FOTOWOLTAICZNEJ

W sytuacji braku dostępu do sieci energetycznej i w przypadku niewielkiego systemu można rozważyć możliwość zasilania go z autonomicznej hybrydowej instalacji fotowoltaicznej. Z reguły jest to rozwiązanie bardziej ekono-

micznie uzasadnione niż przeprowadzanie skomplikowanych procedur i ponoszenie kosztów związanych z budową nowej linii energetycznej. Schemat blokowy takiej instalacji przedstawiono na rysunku 10. Głównym źródłem energii elektrycznej jest tutaj panel złożony z  $n$  modułów fotowoltaicznych. Ponieważ w Polsce w poszczególnych miesiącach występuje duża różnorodność nasłonecznienia, celem jest wspomaganie takiego systemu z dodatkowego źródła energii elektrycznej, którym może być generator spalinowy, turbina wiatrowa lub też rozwiązanie bardzo nowoczesne i perspektywiczne, jakim jest ogniwo paliwowe. Godnym uwagi jest zastosowanie ogniwa paliwowego typu DMFC (*Direct Methanol Fuel Cells*).

Energia elektryczna gromadzona jest w baterii akumulatorów, których ładowanie i rozładowanie jest kontrolowane za pośrednictwem regulatora ładowania z zaimplementowaną techniką MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). Technika ta pozwala na znacznie bardziej efektywne wykorzystanie energii elektrycznej generowanej przez moduły fotowoltaiczne, zwłaszcza w warunkach zimowych oraz w przypadku głębokiego rozładowania akumulatora. System doświetlania SSL LED jest zasilany za pośrednictwem przetwornicy DC/AC zamieniającej napięcie baterii akumulatorów na napięcie 230 V/50 Hz.



Rys. 12. Schemat blokowy autonomicznej hybrydowej instalacji fotowoltaicznej wspomaganiej ogniwem paliwowym

## 5. UWAGI KOŃCOWE

Pomiary charakterystyk spektralnych lamp LED i HPS przedstawione na rysunkach 1-6 i 11 zostały wykonane przez autorów przy pomocy spektrofotometru BTS256 firmy GIGAHERTZ OPTIK.

Pomiary gęstości strumienia fotonów przeprowadzone w odległości 0,5 m od lampy potwierdziły jej pełną przydatność dla potrzeb doświetlania roślin. Do pomiarów użyto miernika LI-250 wyposażonego w sondę LI190 SA, wyprodukowanego przez specjalistyczną firmę LI-COR.

Podsumowując, przedstawiony szczegółowo system stwarza szerokie możliwości dostosowywania go do potrzeb roślin uprawianych pod osłonami. Pokrywa zapotrzebowanie roślin na światło pod względem wymaganego w fotosyntezie spektrum promieniowania elektromagnetycznego oraz gęstości strumienia kwantów, w dostosowaniu do specyficznych warunków uprawy. Daje możliwości sterowania barwami w zależności od wymagań poszczególnych gatunków roślin i etapów ich rozwoju (także w procesie fotomorfogenezy), stanowiąc cenne narzędzie badawcze w fizjologii roślin. Warto podkreślić zalety prezentowanego systemu pod względem możliwości oszczędności energii i ochrony środowiskowej.

Zaprezentowane rozwiązanie zostało zgłoszone w Urzędzie Patentowym. Zgłoszenie patentowe nr P. 397612 pt. "Oświetlacz roślin i sposób sterowania oświetlaczem" [24].

---

Praca realizowana w ramach projektu badawczego nr 2011/01/B/NZ9/00058 finansowanego przez NCN (2011-2014) oraz projektu MIME POIG.01.01.02-00-108/09

## LITERATURA

1. ANSI E1.11 – USITT DMX512-A: Asynchronous Serial Digital Data Transmission Standard for Controlling Lighting Equipment and Accessories.
2. Grzesiak W., Cież M., Nowak S., Zaraska W., Dubert F., Czyczyło-Mysza I.: Application of PV Powered High Intensity LED's for Supplementary Irradiation of Horticultural Plants, Proc. of the 2006 IEEE 4<sup>th</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, May 7-12.2006, Hilton Waikoloa Village, Waikoloa, Hawaii, pp. 2400-2403.
3. Grzesiak W., Cież M., Nowak S., Skwarek A., Dubert F., Czyczyło-Mysza I., Skoczowski A.M.: High Brightness Leds Supplied from Autonomous PV Installation in Proecological Irradiation Systems for Plants Cultivation, 22<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Fiera Milano, Italy, 3-7.09.2007, pp. 3288-3291.
4. Grzesiak W., Cież M., Nowak S., Maj T., Początek J., Skwarek A., Witek K., Dubert F., Czyczyło-Mysza I., Skoczowski A.M.: The Modern Proecological SSL-LED+PV System for Supplementary Irradiation of Plants, Proc. of the 31<sup>th</sup> Int.Conference and Exhibition IMAPS – Poland 2007, Rzeszów-Kraciczyn, Poland, 23-26.09.2007, pp. 291-294.
5. Grzesiak W., Maj T., Początek J.: Porównanie własności aplikacyjnych oświetleń żarowego i LED-owego, VII Krajowa Konferencja Elektroniki, Dąbówko Wschodnie, 02-04.06.2008, s. 473-478.
6. Grzesiak W., Maj T., Początek J.: Porównanie własności aplikacyjnych oświetleń żarowego i LED-owego, Elektronika, 11/2008, s. 230-233.

7. Grzesiak W., Ciez M., Koprowski J.: The Influence of Assembly Technology on Exploitation Parameters of Power SSL-LEDs, Proc. of the 32<sup>nd</sup> International Microelectronics and Packaging IMAPS-CPMT Poland Conference, Warszawa-Pułtusk, Poland, 21-24.09.2008., p. 36/CD.
8. Grzesiak W., Nowak S., Początek J., Skwarek A., Dubert F., Skoczowski A.M., Czyczyło-Mysza I., Kurpaska S.: Zastosowanie diod LED w systemach doświetlania roślin wyzwaniem na dzisiaj i na jutro. *Elektronika* 10, 2009, s. 73-79.
9. Grzesiak W., Bieńkowski A., Żupnik M., Wojciechowska R., Kołtun A., Kurpaska S.: Nowoczesne systemy doświetlania roślin oparte o najnowsze osiągnięcia technologii SSL LED, *Elektronika* 6/2011, s. 137-139.
10. Kalaji M.H., Łoboda T.: Fluorescencja chlorofilu w badaniach stanu fizjologicznego roślin, Wyd. SGGW, Warszawa, 2009.
11. Kim S.J., Hahn E.J., Heo J.W., Paek K.Y.: Effects of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of chrysanthemum plantlets in vitro, *Scientia Horticulturae* 101, 2004, pp. 143-151.
12. Kopcewicz J., Lewak S.: *Fizjologia roślin*, Wyd. PWN, Warszawa, 2007.
13. Kurpaska S.: Technika doświetlania roślin, *Hasło Ogrodnicze*, 07/2004, s. 12-14.
14. Matysiak B.: Doświetlanie roślin ozdobnych, *Hasło Ogrodnicze*, 07/2004, s. 20-22.
15. Puternicki A., Zastosowanie półprzewodnikowych źródeł światła do wspomaganie wzrostu roślin, *Prace Instytutu Elektrotechniki*, zeszyt 245, 2010, s. 70-86.
16. Rutkowski K., Wojciech J.: Metodyka doboru urządzeń do doświetlania roślin w szklarni, *Inżynieria Rolnicza* 11, 2006, s. 417-422.
17. Schaefer E., Nagy F.: *Photomorphogenesis in Plants and Bacteria. Function and Signal Transduction Mechanism*, 3<sup>rd</sup> Edition, Springer, 2006, pp. 662.
18. Shin K.S., Murthy H.N., Heo J.W., Hahn E.J., Paek K.Y.: The effect of light quality on the growth and development of in vitro cultured *Doritaenopsis* plants, *Acta Physiol. Plant.* 30, 2008, pp. 339-343.
19. Smith H.: *Phytochrome and Photomorphogenesis*, McGraw-Hill Book Company (UK) Ltd, 1975, pp. 235.
20. Taiz L., Zeiger E.: *Plant Physiology*, 5<sup>th</sup> ed., Sinauer Associates, Inc, 2011.
21. Wright M.: Precise LED wavelengths spur plant growth, *LEDsmagazine.com*, April/May 2011.
22. Wojciechowska R., Siwek P.: The effect of shading on nitrate metabolism in stalks and blades of celery leaves (*Apium graveolens* L. var. dulce), *Folia Horticulturae*, 18/2, 2006, pp. 25-35.
23. Witryna internetowa: [www.pxm.pl](http://www.pxm.pl).
24. Zgłoszenie patentowe nr P.397612 pt. "Oświetlacz roślin i sposób sterowania oświetlaczem".



## AN INTELLIGENT PLANT IRRADIATION SYSTEM BASED ON SSL LED TECHNOLOGY

Wojciech GRZESIAK, Marek ŻUPNIK  
Renata WOJCIECHOWSKA

**ABSTRACT** *As a result of dynamic progress in SSL LED technology – the up to the present exploited sodium and fluorescent lamps are and will be more and more frequently superseded by light sources, basing on this technology. In the article a complete system assigned for plant irradiation, including in vitro cultivation methods has been presented. Detailed problems dealing with the lamp frames' structure as well as with an intelligent control system enabling implementation of advanced irradiation algorithms – have been discussed.*

*Prospects and economic aspects of powering the system from a hybrid photovoltaic installation have been thoroughly analysed.*

**Keywords:** *SSL LED technology, LED diode, plant lighting, lighting fixture, 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 138 publikacji krajowych zagranicznych, kierownikiem lub głównym wykonawcą dwunastu projektów naukowo-badawczych oraz współautorem kilkunastu patentów. Specjalizuje się w zakresie technologii i konstrukcji mikroelektronicznych układów grubowarstwowych, serwisu i budowy aparatury pomiarowej, technologii rezystorów specjalnych, a przez ostatnie dziewięć lat w tematyce związanej z fotowoltaiką oraz z 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** w 1983 roku ukończyła studia na Wydziale Ogrodniczym Uniwersytetu Rolniczego i tam rozpoczęła pracę. 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 i projektach badawczych 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 autorem lub współautorem ponad sześćdziesięciu oryginalnych publikacji naukowych.