

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

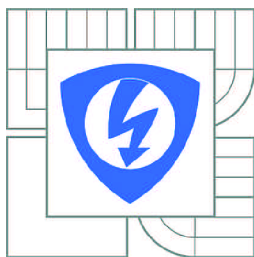
**OSVĚTLOVÁNÍ ROSTLIN POMOCÍ
TECHNOLOGIE LED**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE
AUTHOR**

TOMÁŠ POSPÍŠIL

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Tomáš Pospíšil

ID: 134588

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Osvětlování rostlin pomocí technologie LED

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Fyziologie rostliny a její potřeby k úspěšnému vývoji a růstu.
2. Charakteristické požadavky na osvětlení (rostlina vs. lidské oko).
3. Dosahované parametry světelných diod.
4. Svítidlo založené na LED technologii použitelné pro osvětlování rostlin.
5. Praktické měření, ověřování teoretických předpokladů v laboratoři světelné techniky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 30.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Michal Krbal

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

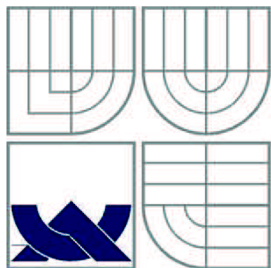
Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

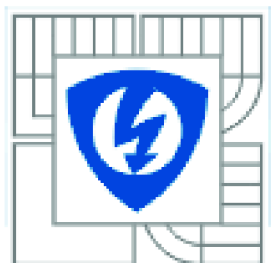
POSPÍŠIL, T. *Osvětlování rostlin pomocí technologie LED*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 57 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Krbal.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení částí druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

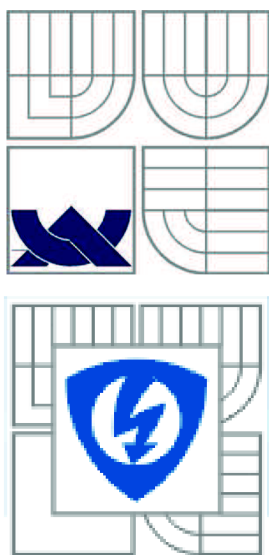
Osvětlování rostlin pomocí technologie LED

Tomáš Pospíšil

vedoucí: Ing. Michal Krbal

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2014

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Master's Thesis

LED technology for Lighting Plants

by

Tomáš Pospíšil

Supervisor: Ing. Michal Krbal

Brno University of Technology, 2014

Brno

ABSTRAKT

Cílem práce je stručně charakterizovat fyziologii rostlin a jejich potřeby vedoucí k úspěšnému vývoji a růstu, dále pak představit charakteristické požadavky na osvětlení rostlin a shrnout, v čem se liší požadavky na osvětlení u lidského oka a rostlin. Stručně jsou také v práci uvedeny světelné veličiny a jejich jednotky, pomocí kterých se posuzuje vhodnost osvětlení pro rostliny. Dalším cílem práce je popsání elektrických a světelně-technických parametrů LED, které jsou vhodné pro použití ve svítidle určeném pro ozařování rostlin. Poté jsou nastíněny základní požadavky, které by mělo svítidlo určené pro osvětlování rostlin splňovat. Poslední část práce je věnována prezentaci a zhodnocení výsledků měření na již vyvinutém prototypovém svítidle využívajícím světelné zdroje LED.

KLÍČOVÁ SLOVA: Fyziologie rostlin; Fotosyntéza; Světlo; Světelné spektrum; Fotosynteticky aktivní záření; LED; Svítidlo;

ABSTRACT

The aim of the work is to describe the physiology of plants and their needs to the successful evolution and growth. Furthermore to introduce a characteristic light requirement of plants and summarize differences between light requirements of the human eye and plants. More there are shortly mentioned the light quantities and units and by means of these quantities and their units there is assessed the appropriateness of lighting for plants. Another aim is to describe the electric and lighting-technical LED parameters that are suitable for use as a lamp designed for illumination of plants, outline the basic requirements that should the lamp designed for illuminating the plants fulfill. The last part is devoted to the presentation and evaluation of the measurement results of the lamp, which was already developed and used on prototype light source using LED.

KEY WORDS: Plant Physiology; Photosynthesis; Light; Light Spectrum; Photosynthetic Active Radiation; LED; Lamp;

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
SYMBOLY A ZKRATKY	12
FYZIKÁLNÍ KONSTANTY A VELIČINY	12
1 ÚVOD	14
2 FYZIOLOGIE ROSTLIN	15
2.1 VÝŽIVA ROSTLIN	15
2.2 VODNÍ REŽIM.....	15
2.3 DÝCHÁNÍ.....	16
2.4 FOTOSYNTÉZA.....	16
2.4.1 SVĚTELNÁ FÁZE	16
2.4.2 TEMNOSTNÍ FÁZE	17
2.5 RYCHLOST FOTOSYNTÉZY.....	18
2.5.1 SVĚTLO	18
2.5.2 KONCENTRACE CO ₂	19
2.5.3 TEPLOTA VZDUCHU	19
2.5.4 TEPLOTA PŮDY	19
2.5.5 VLHKOST VZDUCHU	20
2.5.6 DOSTATEK VODY V PŮDĚ.....	20
2.5.7 SHRNUÍ FAKTORŮ	20
3 CHARAKTERISTICKÉ POŽADAVKY NA OSVĚTLENÍ (ROSTLINA VS. LIDSKÉ OKO).....	21
3.1 SVĚTLO Z POHLEDU ČLOVĚKA.....	22
3.1.1 FOTOMETRICKÉ VELIČINY	22
3.1.2 MĚŘENÍ FOTOMETRICKÝCH VELIČIN	24
3.1.3 CHARAKTERISTICKÉ POŽADAVKY LIDSKÉHO OKA NA OSVĚTLENÍ	24
3.2 SVĚTLO Z POHLEDU ROSTLIN.....	25
3.2.1 VYJÁDŘENÍ FAR VELIČIN	26
3.2.2 MĚŘENÍ FAR	26
3.2.3 CHARAKTERISTICKÉ POŽADAVKY ROSTLIN NA OSVĚTLENÍ	26
4 DOSAHOVANÉ PARAMETRY SVĚTELNÝCH ZDROJŮ	28
4.1 PRINCIP FUNKCE LED	28
4.1.1 BÍLÉ LED	28
4.2 PARAMETRY LED	29
4.2.1 ELEKTRICKÉ PARAMETRY	30
4.2.2 SVĚTELNĚ-TECHNICKÉ PARAMETRY	30
4.3 DOSAHOVANÉ PARAMETRY LED	31
4.3.1 BÍLÉ LED	31
4.3.2 MODRÉ A ČERVENÉ LED	32

4.4 CHLAZENÍ DIOD.....	32
5 SVÍTIDLO ZALOŽENÉ NA LED TECHNOLOGII POUŽITELNÉ PRO OSVĚTLOVÁNÍ ROSTLIN.....	34
5.1 SVÍTIDLO ZALOŽENÉ NA TECHNOLOGII LED	34
5.1.1 VÝBĚR VHODNÝCH SVĚTELNÝCH DIOD	35
5.1.2 SVÍTIDLO.....	35
5.2 KONSTRUKCE PROTOTYPOVÉHO SVÍTIDLA S LED.....	36
5.2.1 PARAMETRY SVĚTELNĚ ČINNÝCH ČÁSTÍ SVÍTIDLA:	37
5.2.2 PARAMETRY ELEKTRICKÝCH A KONSTRUKČNÍCH ČÁSTÍ SVÍTIDLA:	37
5.3 MĚŘENÍ NA PROTOTYPOVÉM SVÍTIDLE.....	37
5.3.1 KŘIVKY SVÍTIVOSTI	37
5.3.2 KŘÍŽOVÉ CHARAKTERISTIKY	38
5.3.3 NAMĚŘENÉ SPEKTRUM	40
5.3.4 PŘÍKON V ZÁVISLOSTI NA VELIKOSTI ŘÍDÍČÍHO NAPĚTÍ	41
5.3.5 OTEPLENÍ JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ SVÍTIDLA.....	41
5.3.6 OSVĚTLENOST A INTENZITA OZÁŘENÍ	46
5.4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ.....	53
6 ZÁVĚR.....	54
POUŽITÁ LITERATURA	56

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Proces fotosyntézy [12]</i>	17
<i>Obr. 3-1 Citlivost na světlo, rostliny vs. lidské oko [12]</i>	21
<i>Obr. 5-1 Křivky svítivosti LED svítidla (Warm White, Royal Blue LED) [18]</i>	38
<i>Obr. 5-2 Křížové charakteristiky LED (Warm White) [18]</i>	39
<i>Obr. 5-3 Křížové charakteristiky LED (Royal Blue) [18]</i>	39
<i>Obr. 5-4 Spektrální distribuce LED svítidla (měřeno po 1 nm) [18]</i>	40
<i>Obr. 5-5 Oteplení LED svítidla bez chlazení [18]</i>	42
<i>Obr. 5-6 Rozmístění teplotních senzorů na LED svítidle [18]</i>	43
<i>Obr. 5-7 Oteplení LED svítidla s vodním chlazením [18]</i>	43
<i>Obr. 5-8 Oteplení LED svítidla s chladiči a aktivní ventilací (Varianta A) [18]</i>	45
<i>Obr. 5-9 Rozmístění teplotních senzorů na LED svítidle [18]</i>	45
<i>Obr. 5-10 Oteplení LED svítidla s chladiči a aktivní ventilací (Varianta B) [18]</i>	46
<i>Obr. 5-11 Osvětlenost – svítidlo LED (Warm White LED) [18]</i>	47
<i>Obr. 5-12 Osvětlenost – svítidlo LED (Royal Blue LED) [18]</i>	47
<i>Obr. 5-13 Osvětlenost – svítidlo LED (Warm White + Royal Blue LED) [18]</i>	48
<i>Obr. 5-14 Osvětlenost – svítidlo LED (Warm White + 60 % Royal Blue LED)</i>	48
<i>Obr. 5-15 Hodnota intenzity ozáření v WFAR – svítidlo LED (Warm White) [18]</i>	49
<i>Obr. 5-16 Hodnota intenzity ozáření v WFAR – svítidlo LED (Royal Blue) [18]</i>	49
<i>Obr. 5-17 Hodnota intenzity ozáření v WFAR – svítidlo LED (Warm White + Royal Blue) [18]</i>	50
<i>Obr. 4-18 Hodnota intenzity ozáření v WFAR – svítidlo LED (Warm White + 60 % Royal Blue) [18]</i>	50
<i>Obr. 5-19 Hodnota intenzity ozáření v μmol – svítidlo LED (Warm White) [18]</i>	51
<i>Obr. 5-20 Hodnota intenzity ozáření v μmol – svítidlo LED (Royal Blue) [18]</i>	51
<i>Obr. 5-21 Hodnota intenzity ozáření v μmol – svítidlo LED (Warm White + Royal Blue) [18]</i> ...	52
<i>Obr. 5-22 Hodnota intenzity ozáření v μmol – svítidlo LED (Warm White + 60 % Royal Blue) [18]</i>	52

SEZNAM TABULEK

Tab. 5-1 Závislost příkoku na řídicím napětí pro LED svítidlo – Warm White LED [18] 41

Tab. 5-2 Závislost příkoku na řídicím napětí pro LED svítidlo – Royal Blue LED [18]..... 41

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly a zkratky

CAM	Rostliny s CAM typem fotosyntézy
CO ₂	Oxid uhličitý
C ₃	Rostliny s C ₃ typem fotosyntézy (Calvinův cyklus)
C ₄	Rostliny s C ₄ typem fotosyntézy (Hatch – slackův cyklus)
FAR	Fotosynteticky aktivní záření
FWHM	Ful Width Half Maximum (Poloviční vyzařovací úhel)
GaAs	Gallium arsenid
GaN	Gallium nitrid
GaP	Gallium phosphide
H	Vodík
H ₂ O	Voda
IR	Infračervené záření
LED	Dioda vyzařující optické záření (z anglického: Light Emitting Diode)
O ₂	Kyslík
PN	Rozhraní (přechod) polovodiče typu P a typu N
RGB	Red – Green – Blue, červená – zelená – modrá
SiC	Karbid křemíku
UV	Ultra fialové záření

Fyzikální konstanty a veličiny

E	Intenzita osvětlení, jednotka: 1 lx
E_n	Normálová složka osvětlenosti, jednotka: 1 lx
E_{FAR}	Intenzita ozáření ve FAR spektru, jednotka: $W_{FAR} \cdot m^{-2}$
E_{mol}	Intenzita fotonového toku ve FAR spektru, jednotka: $mol \cdot s^{-2}$
ϕ	Světelný tok, jednotka: 1 lm
S	Povrch, jednotka 1 m ²
Ω	prostorový úhel
I	Svítivost, jednotka: 1 cd
I_0	Maximální svítivost
L	Jas, jednotka: 1 cd · m ⁻²
λ	Vlnová délka, jednotka: 1 nm

R_a	Index podání barev
T_c	Teplota chromatičnosti
T_n	Náhradní teplota chromatičnosti
t	Čas, jednotka: 1 s
P	Elektrický příkon, jednotka: 1 W
U	Elektrické napětí, jednotka: 1 V
$U_{ř}$	Řídicí napětí, jednotka: 1 V

1 ÚVOD

Viditelné světlo je téměř stejně důležité jak pro rostliny, tak pro lidi. Z hlediska osvětlení mají rostliny zcela odlišné požadavky než lidské oko. Jedná se hlavně o rozdílnou spektrální citlivost. Lidské oko je nejcitlivější na vlnové délky přibližně uprostřed spektra viditelného záření. Naproti tomu rostliny mohou být částečně citlivé i na IR a UV oblasti záření a nejcitlivější jsou na záření na okrajích spektra viditelného záření, tzn. na modrou a na oranžovou až červenou část spektra. Spektrum vhodné pro ozařování rostlin tedy leží v oblasti viditelného záření, a nazýváme jej fotosynteticky aktivní záření (FAR). Spektrální citlivost rostlin záleží také na druhu rostliny a může se navíc měnit během denního cyklu. Dostatečná intenzita záření je také různá pro jednotlivé druhy rostlin. Světelné zdroje LED umožňují požadavkům rostlin vyhovět pravděpodobně zcela nejlépe, ze všech v současné době dostupných světelných zdrojů. Světelné diody zažily v posledních letech nebývalý vývojový pokrok a v dnešní době již mají své pevné zastoupení prakticky ve všech oblastech osvětlování. Tento pokrok je z jisté části způsoben tím, že Evropská komise svým nařízením z roku 2012 zakázala všechny klasické wolframové žárovky, a proto dochází k rozmachu světelných zdrojů s vyšší účinností přeměny elektrické energie na energii světelnou. Mezi tyto světelné zdroje patří také LED, z nichž některé jsou vhodné právě k ozařování rostlin. LED mají jednu z nejvyšších účinností přeměny elektrické energie na světlo a mají také velmi dobré elektrické a světelné technické parametry, mezi které patří hlavně dlouhá doba života, vysoký měrný výkon a vysoký světelný tok.

Cílem práce je stručně charakterizovat fyziologii rostlin a jejich potřeby vedoucí k úspěšnému vývoji a růstu, dále pak představit charakteristické požadavky na osvětlení rostlin a shrnout, v čem se liší požadavky na osvětlení u lidského oka a rostlin. V práci jsou uvedeny a stručně vysvětleny světelné veličiny a jejich jednotky, pomocí kterých se posuzuje vhodnost LED pro ozařování rostlin, a dále jsou zde shrnuty jejich dosahované parametry. Závěrečná část práce je věnována prezentaci a zhodnocení výsledků měření na již vyvinutém prototypovém LED svítidle, které je navrženo podle teoretických předpokladů s ohledem na potřeby rostlin.

2 FYZIOLOGIE ROSTLIN

Fyziologie rostlin se zabývá životními funkcemi a vývojem rostlin. Využívá poznatků cytologických, anatomických a morfologických. Studuje vnitřní pochody rostlin, jako jsou: růst, vývoj, minerální výživa, fotosyntéza, dýchání, vodní režim a rozmnožování.

2.1 Výživa rostlin

Mezi rostlinou a prostředím, ve kterém se rostlina nachází, probíhá neustále výměna látek a energie. Rostlina přijímá z prostředí látky potřebné pro své životní děje (vodu, kyslík, oxid uhličitý a živiny). Tyto látky jsou přijímány v roztocích nebo v plynné formě.

Podle způsobu získávání uhlíku dělíme rostliny na autotrofní a heterotrofní. Heterotrofní rostliny získávají uhlík z organických látek a ještě je dále dělíme na saprofyty a parazity [3]. Většina rostlin jsou ovšem autotrofní organizmy, které přijímají uhlík z oxidu uhličitého (CO_2) ze vzduchu a dále pak přijímají vodu (H_2O) a další výživné látky z půdy [3]. Z těchto jednoduchých anorganických látek pak rostliny fotosyntetickou asimilací vyrábějí organické látky. Pro tento proces rostliny potřebují světlo, které je pohlcováno v zeleném barvivu (chlorofyl) a pomocí chloroplastů dochází k přeměně této světelné energie na energii chemickou.

Rostliny potřebují k růstu také makrobiogenní a mikrobiogenní prvky. Mezi nejvýznamnější makrobiogenní prvky patří: uhlík, vodík, kyslík, dusík, síra, fosfor, draslík, vápník a hořčík. Mezi nejvýznamnější mikrobiogenní prvky patří: železo, měď, zinek, mangan, chlor, bor.

Další podmínkou přežití rostlin je vyvážený příjem a výdej vody.

2.2 Vodní režim

Rostliny obsahují za dobrých životních podmínek asi 70 % vody, některé literatury uvádějí dokonce až 90% [7], z toho je jasně patrné, že dostatek vody je pro rostliny velmi důležitý. Voda se v rostlinách účastní chemických reakcí (např. při fotosyntéze), dále je důležitá pro transport látek, při kterém funguje jako rozpouštědlo. Voda také plní termoregulační funkci, účastní se metabolických reakcí a je potřebná při rozmnožování výtrusných rostlin. Vodní režim zahrnuje příjem, vedení a výdej vody:

- Příjem vody může probíhat buď celým povrchem těla rostliny (u nižších rostlin a ponořených vyšších vodních rostlin), nebo kořenovým systémem. Přijímání vody kořenovým systémem dělíme na pasivní a aktivní. Pasivní probíhá u rostlin s listy, voda jde mezibuněčnými prostory, tento proces je rychlejší než aktivní a nespotřebovává se při něm energie rostliny. Aktivní probíhá u rostlin bez listů a pracuje na principu osmózy (probíhá přes polopropustnou membránu, přes kterou projde jen voda), tento proces je pomalý a spotřebovává se při něm energie rostliny.
- Vedení vody probíhá tak, že přijatá voda a minerály v ní rozpuštěné, se pomocí systému cévních svazků dostává do celého těla rostliny.
- Výdej vody dělíme podle způsobu výdeje vody rostlinou, na transpiraci a gutaci. Při transpiraci dochází k odpařování vody z listů. Jedná se o pasivní děj, při kterém není vyžadována energie. Při gutaci dochází k vytlačování vody v kapalném stavu, nastává při velké vzdušné vlhkosti, kdy dochází k pozastavení transpirace.

2.3 Dýchání

Dýchání je nezbytné pro život rostliny. Rostliny dýchají stejně jako drtivá většina všech organismů kyslík (O_2). Dýchání probíhá ve dne i v noci, ovšem ve dne převládá nad dýcháním fotosyntéza, tzn., že v součtu rostliny vyprodukují víc kyslíku, než kolik ho spotřebují dýcháním. Kyslík vniká do rostliny celým povrchem těla. Oxid uhličitý je společně s vodou při dýchání uvolňován průduchy v nadzemních částech rostliny. Dýchání je nejdůležitější katabolický proces, při kterém se uvolňuje energie rozkladem organických látek na jednodušší látky. Takto získaná energie je poté v rostlině využita na růst, příjem nebo syntézu látek. Díky energii, kterou rostliny takto získávají při dýchání, mohou rostliny po určitou dobu žít i bez fotosyntézy (např. v noci, při kvetení neolistěných stromů na jaře, klíčení semen atd.).

Jsou-li podmínky fotosyntézy nad kompenzačním bodem (tj. při fotosyntéze vzniká víc asimilátů, než je spotřebováno dýcháním), je možné stanovit rozdíl mezi celkovou fotosyntetickou produkcí sušiny a spotřebou asimilátů při dýchání jako čistou fotosyntézu [23]. Rychlost výdeje CO_2 v noci odpovídá přibližně 14% denního příjmu při fotosyntéze [23]. Pokud předpokládáme rovnoměrné rozložení dýchání do celého dne i noci, pak je za 24 hodin prodýcháno asi 25% vytvořených asimilátů [23]. Rychlost dýchání není stálou hodnotou, ale je ovlivňována druhem rostliny, fází růstu a vývoje.

V období rychlého růstu dýchají intenzivně celé rostliny, rychlost dýchání se ještě zvyšuje v období kvetení, a potom klesá v období tvorby a zrání semen.

2.4 Fotosyntéza

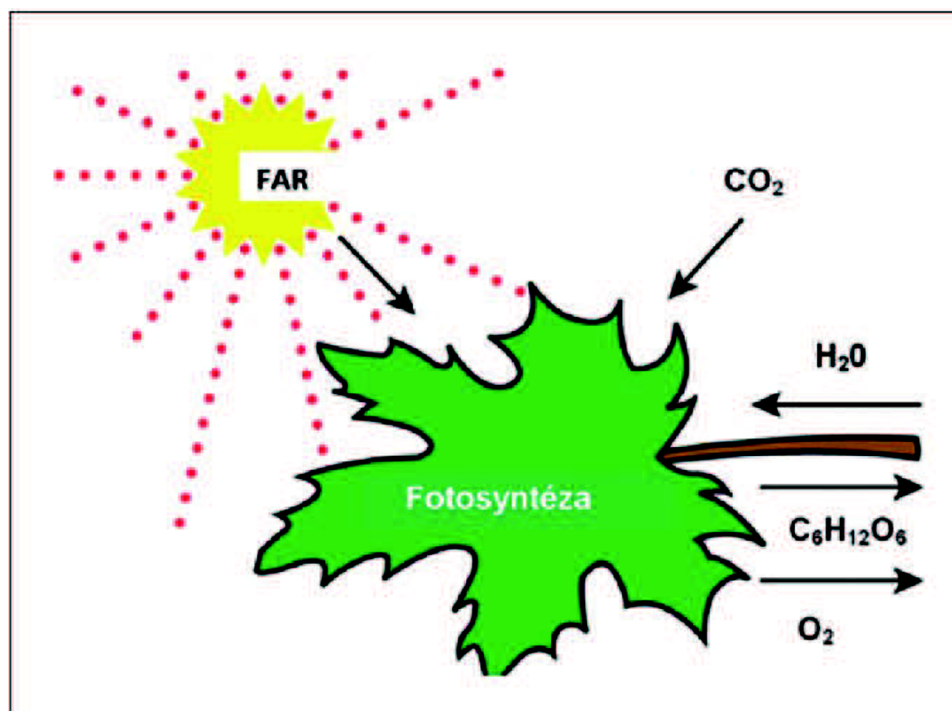
Je to základní proces, zabezpečující život na zemi, protože je to jediný děj na Zemi, při kterém se uvolňuje kyslík.

Pro rostliny je to nejdůležitější energetický proces, při kterém dochází díky pohlcování světelného záření k přeměně oxidu uhličitého a vody na sacharidy (cukry) a další látky (asimiláty), které jsou základem pro stavbu rostlinných tkání. CO_2 je rozkládán na uhlík a kyslík [4], pomocí energie získané z dopadajícího záření na rostlinu.

Rostliny získávají světelnou energii prostřednictvím světelných kvant, fotonů [12]. Fotony jsou pohlcovány z největší části chlorofylem, ale částečně i jinými pigmenty [12]. Každý přijatý foton vždy uvolní jeden elektron, jehož energie se využívá při biochemických procesech. Tyto procesy dělíme na anabolické a katabolické. Při anabolických procesech se z jednoduchých látek vytvářejí složitější látky, nejvýznamnějším anabolickým procesem v těle rostliny je fotosyntéza. Katabolické procesy jsou rozkladné procesy, při kterých naopak ze složitých látek vznikají jednoduché, přičemž dojde k zisku energie (dýchání). Děje fotosyntézy dělíme na světelnou fázi a temnostní fázi.

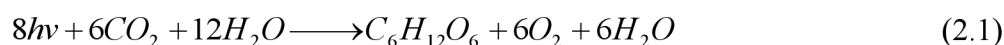
2.4.1 Světelná fáze

Probíhá pouze za přítomnosti světla. Ve světelné fázi fotosyntézy pohlcují barevné pigmenty rostlin světlo a tato energie fotonů je využita ke štěpení molekul vody a k tvorbě dalších molekul, které jsou důležité pro procesy probíhající v temnostní fázi. Voda je rozložena na vodík (H), který je potřebný v temnostní fázi fotosyntézy, a na kyslík, který uniká průduchy v listech do ovzduší. Na Obr. 2-1 je znázorněn proces Světelné fáze fotosyntézy.



Obr. 2-1 Proces fotosyntézy [12]

Velmi zjednodušeně lze fotosyntézu popsat podle [7] následující sumární rovnicí:



Ze vztahu (2.1) vyplývá, že k fotosyntetickým procesům, ve světelné fázi fotosyntézy, dochází pouze při dostatečně vysoké intenzitě ozáření (ve vztahu (2.1) symbolizuje $8hv$ příjem 8 fotonů [7]) a dostatku CO_2 v ovzduší a dostatečné zásobě H_2O v těle rostliny. Při Fotosyntéze dochází k tvorbě asimilátů, do těla rostliny se dostává CO_2 a dochází k uvolňování kyslíku [7].

2.4.2 Temnostní fáze

Tyto reakce jsou nezávislé na světle. Oxid uhličitý se do rostlin dostává průduchy. Z vázaného oxidu uhličitého, vodíku získaného ve světelné fázi fotosyntézy z vody a chemické energie vznikají sacharidy. Tento děj probíhá v kapalně části chloroplastů a může probíhat několika způsoby podle toho, v jakých rostlinách k němu dochází. Známé jsou tři způsoby fixace CO_2 , a to: Calvinův, Hatch – slackův a CAM cyklus.

2.4.2.1 Calvinův cyklus

Je také nazýván C_3 -cyklus, protože první stálý produkt obsahuje tři atomy uhlíku. Tento cyklus probíhá ve třech fázích. Dochází v nich k poměrně složitým chemickým reakcím, jejichž vysvětlení není cílem této práce, proto zde tyto fáze jen lehce nastíním. V první fázi (karboxylace) dochází k fixaci CO_2 na výchozí substrát rubilóza 1,5 biofosfát [3]. V druhé fázi (redukce) se redukuje tříuhlíkatý meziprodukt na glyceraldehyd 3 fosfát [3]. Ve třetí fázi (regenerace) vznikají opět tři molekuly rubilóza 1,5 biofosfátu, čímž se celý cyklus uzavírá [3].

Tento cyklus probíhá u tzv. C_3 rostlin, což jsou převážně rostliny mírného pásma. Nevýhodou těchto rostlin je, že u nich probíhá poměrně intenzivní fotorespirace (světelné dýchání), při které dochází ke ztrátám vlivem štěpení produktů vzniklých při fotosyntéze a tím

pádem je snižována účinnost fotosyntézy (Při fotorespiraci je množství vydechovaného CO₂ několikanásobně vyšší, než při dýchání ve tmě [3]).

2.4.2.2 Hatch – Slackův cyklus

Bývá také nazýván C₄-cyklus, protože při něm vznikají produkty, které obsahují 4 atomy uhlíku. Tyto 4 uhlíkaté sloučeniny jsou poté redukovány na malát. Z malátu je poté CO₂ uvolňován do Calvinova cyklu. Tímto způsobem dochází k výraznému snížení ztrát způsobených fotorespirací, ale zároveň se spotřebovává více energie [5]. S Hatch – Slackovým cyklem se setkáváme u tzv. C₄ rostlin. C₄ rostliny jsou většinou, právě kvůli vyšším nárokům na energii, tropické rostliny.

2.4.2.3 CAM cyklus

Tento cyklus je obměnou C₄ cyklu. CAM cyklus probíhá u pouštních rostlin, které musí šetřit své zásoby vody. Tyto rostliny proto otevírají své průduchy pouze v noci, kdy je nižší teplota. Po otevření průduchů vážou CO₂ do malátu [5]. Ve dne kdy je vyšší teplota, jsou průduchy uzavřeny, čímž jsou minimalizovány ztráty vody. Během dne se štěpí malát na CO₂, který vstupuje do Calvinova cyklu, a na další látku ze které se syntetizuje škrob, který je potřebný na ukládání CO₂, získávaného během noci [5].

2.5 Rychlost fotosyntézy

Můžeme ji stanovit například z měření produkce O₂ nebo spotřeby CO₂. Rychlost fotosyntézy závisí na řadě faktorů, které dělíme na vnitřní a vnější. Z vnitřních faktorů se jedná zejména o stáří listů a množství chlorofylu (např. maximální rychlost fotosyntézy má list v období, kdy dosahuje 50 – 80 % své konečné velikosti [7]). Při nízkém obsahu chlorofylu může nastat tzv. chlorofylový kompenzační bod, tj. stav rovnováhy mezi fotosyntézou a dýcháním [3] (asimiláty vznikající při fotosyntéze jsou spotřebovány dýcháním). To jsou faktory, které my neovlivníme, proto se zaměřím na vnější faktory, které jsme schopni ovlivnit.

K nejdůležitějším vnějším faktorům podle [12] patří: dostatek světla, koncentrace CO₂, teplota a vlhkost vzduchu, teplota půdy, obsah vody v půdě a dostatek živin.

2.5.1 Světlo

V praxi jsou všechny tyto vnější faktory téměř rovnocenně důležité pro správný růst rostlin. Avšak při nedostatku světla je omezena optimalizace i ostatních faktorů [12]. Dostatek světla je tedy předpokladem pro optimalizaci ostatních vnějších faktorů ovlivňujících rychlost fotosyntézy. Rychlost fotosyntézy ovlivňuje intenzita a spektrum světelného záření.

2.5.1.1 Spektrum světelného záření

Spektrum slunečního záření obsahuje širokou oblast optického záření, které obsahuje ultrafialové záření (UV, vlnové délky 300 až 380 nm), viditelné záření (380 až 780 nm), a infračervené záření (IR, 780 až 3000 nm). Spektrum vhodné pro fotosyntézu leží v oblasti viditelného záření a nazývá se fotosynteticky aktivní záření (FAR). FAR obsahuje vlnové délky 400 až 700 nm. Spektrální citlivost rostlin je jiná než spektrální citlivost lidského oka. Lidské oko má největší citlivost přibližně uprostřed viditelného spektra (s maximem kolem 555 nm [17]), naopak rostliny mají největší citlivost v oblastech na krajích viditelného spektra (v „modré“ a „červené“ části spektra viditelného záření).

2.5.1.2 Intenzita světelného záření

S přibývajícím intenzitou FAR se zvyšuje rychlost fotosyntézy (absorpce CO_2). V okamžiku kdy se příjem a výdej CO_2 vyrovnává, nastává tzv. světelný kompenzační bod [3]. Ten je velmi důležitý pro stanovení mezní intenzity ozáření, při které ještě asimilační produkty přispívají k růstu rostlin. Pokud je hodnota intenzity FAR nižší, tak rostliny sice asimilují, ale asimilát je spotřebováván dýcháním rostlin [3]. Účinnost fotosyntézy je vyšší při menších hodnotách intenzity FAR a s rostoucí intenzitou FAR se účinnost snižuje [17]. Při zvyšování intenzity FAR roste rychlost fotosyntézy, až dojde k jejímu ustálení (rostlina se dostala do tzv. bodu nasycení). Při dosažení tohoto bodu už se rychlost fotosyntézy nezvyšuje a při velmi vysokých intenzitách záření může dojít až k poškození fotosyntetického aparátu [5].

2.5.2 Koncentrace CO_2

Oxid uhličitý obsažený v ovzduší je nepostradatelná látka pro fotosyntézu rostlin. Při fotosyntéze je CO_2 rozkládán na uhlík a kyslík, který je uvolňován zpět do okolí. Běžná koncentrace CO_2 ve vzduchu je asi 0,03 %, pokud klesá koncentrace CO_2 , tak klesá i rychlost fotosyntézy a pokud koncentrace klesne pod 0,01 %, tak dojde k zastavení fotosyntézy [3]. Naopak zvyšování koncentrace CO_2 až do 3 % obsahu ve vzduchu má za následek zrychlení fotosyntézy (tím pádem i růstu rostliny) [17].

2.5.3 Teplota vzduchu

Požadavky na teplotu závisí nejen na druhu rostliny, ale mění se i v závislosti na fázích vývoje rostliny. Obecně platí, že rostlina vyžaduje vyšší teplotu při tvorbě květů než při růstu.

Teplota ovlivňuje zejména sekundární fázi fotosyntézy [5]. Fotochemický proces je na teplotě závislý méně. Teplota ovlivňuje hlavně fixaci CO_2 . Pro zkoumání vlivu teploty na fotosyntézu je potřeba se zaměřit na teploty, při kterých nedojde k poškození fotosyntetického aparátu. Toto rozmezí teplot není pro všechny rostliny stejné, ale liší se podle druhu rostliny. Například pro rostliny mírného pásma je toto rozmezí teplot asi 7 až 40°C [5]. Rozsah teplot, kde dosáhneme kladné hodnoty čisté fotosyntézy, můžeme rozdělit na dvě oblasti, a to na oblast kde má zvyšování teploty za následek zvyšování rychlosti fotosyntézy a na oblast kdy má zvyšování teploty naopak za následek zpomalování fotosyntézy. Tyto oblasti jsou podle [5] vymezeny třemi body: teplotním minimem, optimem a maximem. Teplotním optimem nazýváme takovou teplotu, při níž dosahuje fotosyntéza více než 90% svého možného maxima. Oblast teplotního optima fotosyntézy má užší rozsah než oblast optimálních teplot pro příjem CO_2 , protože se s vyšší teplotou zrychluje současně s fotosyntézou i rychlost dýchání a tím se čistý zisk fotosyntézy snižuje. Rychlost fotosyntézy i rychlost dýchání roste v závislosti na rostoucí teplotě exponenciálně [5].

Teplota má také vliv na fotorespiraci. Ztráty CO_2 rostou se zvyšující se teplotou okolí. Rychlost fotorespirace (i dýchání) roste s teplotou i poté, co se fotosyntéza dostane na difuzní omezení. Pro pozitivní růstové procesy je proto nezbytné, aby celkové množství asimilovaného CO_2 převyšovalo množství, které se z rostliny uvolňuje respirací a fotorespirací [5].

2.5.4 Teplota půdy

Teplota půdy má velký vliv na klíčení, vzcházení a také na další vývoj rostlin. K ohřívání (ochlazování) půdy dochází od jejího povrchu, tzn., že se mění s teplotou vzduchu. Rychlost ohřívání půdy velmi ovlivňuje její tepelná kapacita, která je závislá na obsahu vody v půdě.

K ohřívání suché půdy dochází rychleji než k ohřívání vlhké půdy. Teplota půdy také ovlivňuje rychlost příjmu vody rostlinami.

2.5.5 Vlhkost vzduchu

Správná vlhkost vzduchu patří také mezi základní životní podmínky rostlin, protože ovlivňuje vypařování vody z rostliny (transpiraci). V růstové fázi je optimální vlhkost vzduchu pro většinu rostlin kolem 80%.

Pokud je rostlina v prostředí s nízkou vlhkostí vzduchu, tak dochází k jejímu odvodnění vlivem zvýšeného výparu. Naopak při velké vzdušné vlhkosti se transpirace snižuje a může dojít k zapaření rostlin [6]. Nadměrná vzdušná vlhkost může být nebezpečná pro rostliny také tím, že podporuje rozvoj houbových chorob [6].

Vlhkost vzduchu můžeme zvyšovat buď rosením, nebo použitím zvlhčovače vzduchu (odpařovače). Výhodou rosení nebo zvlhčování vzduchu je hlavně to, že při něm nemůže dojít k přemokření kořenového balu. To může být pro rostliny velmi škodlivé, neboť může dojít k zahánění kořenů. Rostliny se nesmějí rosit na slunci, neboť by mohlo dojít k popálení listů. Vhodné je rostliny rosit periodicky, alespoň ráno a večer. Důležité je při rosení použití měkké vody, protože tvrdá voda obsahuje rozpuštěné soli a minerály, které mohou ucpávat průduchy na listech.

2.5.6 Dostatek vody v půdě

Voda se v rostlinách přímo účastní chemických reakcí při fotosyntéze, proto má její dostatek na rychlost fotosyntézy velký vliv.

Při nedostatku vody může dojít k snížení fotosyntézy buď přímým vlivem na schopnost rostliny asimilovat CO_2 , nebo vlivem uzavírání průduchů v listech, čímž je de facto zamezeno vstupu CO_2 do rostliny. Nejvíce přijímané vody z půdy spotřebovává rostlina na pokrytí výparu (transpirace), aby nevysychala pletiva a rostlina se nepřehřívala. Pokud je výdej vody transpirací větší než její příjem kořeny, pak rostlina vadne a dochází k zavírání průduchů. Tím je ovšem omezen nejen výdej vody, ale i příjem CO_2 , který průduchy vstupuje do listů, a který je nezbytný pro fotochemické procesy fotosyntézy. Proto dochází vlivem nedostatku vody ke zpomalování fotosyntézy. Při dlouhodobém nedostatku vody a následném odvodnění rostlinných pletiv dochází k výrazným fyziologickým poruchám rostliny, což může vést až k jejímu zahynutí.

2.5.7 Shrnutí faktorů

Pokud chceme dosáhnout co nejvyšší rychlosti fotosyntézy a tím pádem i růstu, musí být všechny výše uvedené faktory ovlivňující fotosyntézu v rovnováze. Tzn. při zvýšení koncentrace CO_2 musí být zajištěna i zvýšená intenzita ozáření o správném spektru, dostatečná vlhkost a optimální teplota okolí a půdy. Fotosyntéza se může zastavit, pokud je obsah CO_2 ve vzduchu nízký a při tom je vysoká úroveň ozáření a závlahy. Fotosyntéza také nebude probíhat zcela optimálně, pokud bude vysoký obsah CO_2 , ale nebude zajištěno tomu odpovídající množství ozáření a závlahy.

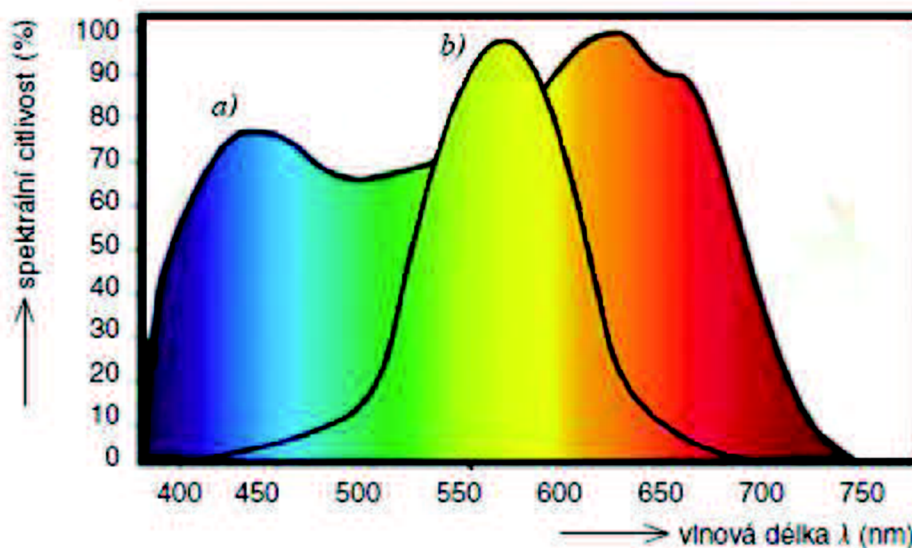
3 CHARAKTERISTICKÉ POŽADAVKY NA OSVĚTLENÍ (ROSTLINA VS. LIDSKÉ OKO)

V předchozí kapitole byly objasněny některé vnější faktory ovlivňující rychlost fotosyntézy, mezi nimi také spektrální složení a intenzita záření. Tato část práce je zaměřena na rozdíly vnímání světelného záření mezi rostlinami a lidským okem, dále pak na veličiny používané při posuzování vhodnosti osvětlení.

Elektromagnetické záření dopadající na zemský povrch můžeme podle [8] a [12] rozdělit do několika skupin, podle vlnových délek (λ) záření:

- **Ultrafialové záření**, (UV) o vlnových délkách od 300nm do 380nm. Fotosyntetický i tepelný účinek tohoto záření je zanedbatelný, naopak má toto záření významné fotodestrukční účinky. Toto záření je z velké části pohlcováno ozonovou vrstvou.
- **Viditelné záření**, o vlnových délkách od 380nm do 780nm. Toto záření je jak už název napovídá viditelné lidským okem a také má významný fotosyntetický účinek. Nazýváme jej světlo.
- **Infračervené záření**, (IR) o vlnových délkách od 780nm do 3000nm. Infračervené záření je významné hlavně v tepelné oblasti.

Pro nás je nejzajímavější viditelné záření, které nazýváme světlo (380 – 780 nm). Světlo je téměř stejně důležité jak pro rostliny, tak pro lidi. Ovšem z pohledu lidí a rostlin je zde velmi zásadní rozdíl v citlivosti na různé vlnové délky. Pro názornost jsem si dovilil z [12] vložit obrázek:



Obr. 3-1 Citlivost na světlo, rostliny vs. lidské oko [12]

Z této závislosti relativní citlivosti na vlnových délkách světla je jasně patrné, že spektrální citlivost rostlin a lidského oka je velmi odlišná. Lidské oko je nejcitlivější na vlnové délky přibližně uprostřed spektra viditelného záření (křivka b), s maximem přibližně v 555 nm).

Rostliny reagují na FAR (tj. záření o vlnových délkách 400 až 700 nm), a jak je vidět na Obr. 3-1, tak mají v oblasti uprostřed spektra viditelného záření jistý propad citlivosti. Nejvyšší

spektrální citlivost mají rostliny na okrajích spektra viditelného záření (křivka a)), a to v oblasti modrého světla (s maximem přibližně v 450 nm [17]) a v oblasti červeného světla (s maximem kolem 650 nm [17]).

Tohle je velice důležitá informace, neboť většina světelných zdrojů je určena pro potřeby lidského oka, tzn., že jsou navrženy tak, aby vyzařovaly světlo vhodné pro lidské oko, a tím pádem vyzařují jen velmi málo FAR. Proto nejsou světelné zdroje určené pro potřeby člověka příliš vhodné pro osvětlování rostlin. Podobný problém máme i při měření pomocí fotometrických přístrojů, protože i ty jsou navrženy tak, aby měřily světlo podobně, jako jej vnímá lidské oko. Proto se světlo určené pro rostliny nehodnotí pomocí fotometrie, ale používají se jiné metody a jednotky světelných veličin na posouzení vhodnosti osvětlení pro rostliny.

3.1 Světlo z pohledu člověka

Jak už bylo řečeno, světlem se nazývá taková část elektromagnetického záření, která je detekována lidským zrakem. Zrakové čidlo (oko) zachycuje toto elektromagnetické záření, včetně jeho prostorového rozložení a spektrálního složení a na základě toho vzniká zrakový vjem. Aby mohl zrakový vjem vzniknout, musí existovat světelný zdroj, který do okolí světlo vyzařuje. Po dopadu na osvětlované plochy se světlo částečně pohltí, částečně odrazí a část může projít osvětlovaným materiálem. Pro zrak je důležitá odražená část světla, a to konkrétně ta část odraženého světla, která se dostane do oka a na světlo citlivé buňky na sítnici, kde vyvolá fotochemickou reakci [9]. O tom jak bude reakce silná, rozhoduje nejen absolutní množství energie, ale i spektrální složení. Proto definujeme spektrální citlivost lidského oka, která je závislá na barevném složení zkoumaného záření, a světelnou účinnost optického záření. Pomocí nich určujeme podíl jednotlivých vlnových délek na vzniku zrakového vjemu. Veličiny, pomocí kterých popisujeme záření viditelné lidským okem, nazýváme fotometrické.

Je důležité si uvědomit rozdíl mezi fyzikálně měřitelnou světelnou energií, která má svůj tepelný nebo mechanický ekvivalent, a energií světelnou, jejíž ekvivalent nemáme reálně k dispozici [9]. Proto, abychom mohli definovat fotometrické veličiny, jsme stanovili tzv. normálního fotometrického pozorovatele, což je průměrný člověk a jeho vidění [10]. Citlivost oka reálného pozorovatele se může od normálního fotometrického pozorovatele znatelně lišit, což může způsobovat jisté rozpory v interpretaci barvy, množství i kvality světla u různých reálných pozorovatelů.

3.1.1 Fotometrické veličiny

Fotometrické veličiny se omezují pouze na elektromagnetické záření viditelné lidským okem. Definujeme je podle citlivosti normálního fotometrického pozorovatele, tudíž jsou závislé na barevném složení zkoumaného záření. Tyto veličiny tím pádem nemají v podstatě fyzikální smysl. Protože jsou fotometrické veličiny důležité při posuzování světelných zdrojů, tak si je rozebereme podrobněji.

3.1.1.1 Světelný tok (světelný výkon)

Zatímco se zářivá energie (zářivý výkon) udává ve wattech stejně jako jiné výkony, tak se světelná energie (světelný výkon) udává v lumenech (lm). Lumen udává výkon světelného zdroje v ekvivalentu, který je možné vyhodnotit lidským zrakem. 1 lumen můžeme definovat jako $1/683$ W monochromatického záření s frekvencí $540 \cdot 10^{12}$ Hz, což je frekvence pro kterou má

oko normálního fotometrického pozorovatele stanovenu nejvyšší účinnost optického záření (100%) [9].

Světelný tok ϕ tedy vyjadřuje intenzitu zrakového vjemu normálního fotometrického pozorovatele, vyvolaného energií světelného záření, které projde za jednotku času určitou plochou v prostoru, kterým se světlo šíří. Světelný tok může vycházet ze zdroje v určitém prostorovém úhlu. Prostorovým úhlem rozumíme tu část prostoru vymezeného obecnou kuželosečkou, jejíž vrchol je v místě středu vycházejícího záření. Jednotkou prostorového úhlu je steradián (sr). Velikostně je 1 steradián roven ploše, kterou kuželosečka vytne na povrchu jednotkové koule (tj. koule o poloměru 1m), jejíž střed leží ve vrcholu kužele [9].

Nejvyšší hodnota prostorového úhlu je $\Omega_{MAX} = 4\pi$, což je prostorový úhel celého prostoru, tedy povrch celé jednotkové koule $S = 4\pi r^2 = 4\pi \cdot 1^2 = 4\pi$. Důležitý pro výpočty je prostorový úhel $d\Omega$, je to úhel, pod nímž je vidět element plochy dS z bodu P obecné plochy A ve vzdálenosti r . Jeho výpočet se podle [9] provádí pomocí vztahu:

$$d\Omega = \frac{dS \cdot \cos \beta}{r^2} \quad (sr, m^2, m) \quad (3.1)$$

Kde:

- β je úhel, který svírá normála elementu dS s osou elementárního prostorového úhlu
- r je vzdálenost bodu pozorování a středu elementární plochy dS .

3.1.1.2 Svítivost

Svítivost patří mezi základní jednotky soustavy SI, její jednotka je kandela (cd). Je důležitá pro vyjádření dalších fotometrických jednotek. Svítivost je vektor, je tedy určena velikostí a směrem. Směr je určen úhlem γ . Svítivost si můžeme představit jako soubor vektorů, vycházejících ze zdroje světla, jejichž velikost v daných směrech odpovídá svítivosti v daném směru [10]. Pokud spojíme koncové body těchto vektorů, dostaneme tzv. fotometrickou plochu svítivosti, z níž obvykle stačí znát pouze řez některou její rovinou, procházející světelným zdrojem [9]. Tímto způsobem můžeme popsat vyzařování světla do různých směrů, protože světelné zdroje nesvítí většinou do všech směrů stejně.

Pokud známe světelný tok, který prochází určitým malým prostorovým úhlem, můžeme potom svítivost vyjádřit podle následujícího vztahu:

$$I_\gamma = \frac{d\phi}{d\Omega} \quad (cd, lm, sr) \quad (3.2)$$

3.1.1.3 Intenzita osvětlení

Je to další velice významná fotometrická veličina. V praxi je nesledovanější veličinou světelné techniky. Jednotkou intenzity osvětlení je lux (lx). Pokud světelný tok dopadá na určitou plochu S, vzniká určitá intenzita osvětlení. Intenzita osvětlení je tedy definována takto:

$$E = \frac{d\phi}{dS} \quad (lx, lm, m^2) \quad (3.3)$$

Prostorová hustota elektromagnetického záření klesá se čtvercem vzdálenosti, tím pádem klesá se čtvercem vzdálenosti i intenzita osvětlení [9]. Pokud známe svítivost zdroje a vzdálenost, můžeme tuto závislost vyjádřit (tzv. čtvercový zákon):

$$E = \frac{I_{\gamma}}{r^2} (lx, lm, m) \quad (3.4)$$

Nejvýznamnější při vnímání osvětlované plochy je normálová (kolmá) složka osvětlenosti. Ve světelné technice nám to popisuje Kosinův zákon dopadu světla:

$$E_n = \frac{I}{r^2} \cdot \cos \beta (lx, lm, m) \quad (3.5)$$

3.1.1.4 Jas

Pro člověka je z hlediska vidění nejdůležitější veličinou kontrast neboli rozdíl jasů. Jas je další fotometrická veličina, která vyjadřuje množství světelného toku, který se odrazí nebo vychází z určitého elementu v určitém směru k místu, v němž je pozorovatel. Jednotkou jasu je kandela na čtvereční metr ($cd \cdot m^{-2}$). Jas se dá také vyjádřit jako poměr svítivosti, kterou disponuje svítící nebo odrážející elementární ploška ve směru k pozorovateli, ku průměrné ploše této plošky na směr pozorování [9]. Jas se dá tedy vyjádřit pomocí vztahu:

$$L = \frac{I_{\gamma}}{dS \cdot \cos \gamma} (cd \cdot m^{-2}, cd, m^2) \quad (3.6)$$

3.1.2 Měření fotometrických veličin

Při měření fotometrických veličin se používají buď subjektivní metody, nebo objektivní metody. Při subjektivních metodách se jako indikátor používá lidský zrak, měření jsou tedy závislá na individuálních vlastnostech zraku pozorovatelů, proto se používají častěji objektivní metody. Při použití objektivních metod je měřené záření převedeno pomocí fotosenzorů na elektrickou veličinu, která je poté vyhodnocena [11].

3.1.2.1 Měření osvětlení

Nebo též měření osvětlenosti, je důležité pro posouzení kvality osvětlovací soustavy. K měření osvětlenosti slouží luxmetry, které se skládají z přijímače s korigovaným fotočlánkem a z měřicího systému, který je opatřen digitálním nebo analogovým indikátorem, který nám zobrazuje změřenou osvětlenost v jednotkách lx.

3.1.3 Charakteristické požadavky lidského oka na osvětlení

Člověk přijímá zrakově většinu informací z okolního světa, proto je světlo základním předpokladem pro život, pohodu a zdraví člověka. Protože každý člověk tráví podstatnou část života ve vnitřních prostorech, je kvalita osvětlení těchto míst velmi důležitá. Vnitřní prostory bývají osvětleny světlem denním, umělým nebo kombinací denního a umělého osvětlení. Umělé osvětlení nám vytváří vhodné podmínky v místech a čase, kdy není možné zajistit potřebnou intenzitu přirozeného denního světla. Umělé osvětlení musí splňovat jak kvantitativní tak kvalitativní požadavky lidského oka na osvětlení.

Pro dobré vidění je důležitá především dostatečná intenzita osvětlení, barva světla, jas a přiměřený kontrast (poměr nejvíce a nejhůře osvětlených ploch v zorném poli pozorovatele). Velké kontrasty jsou vhodné pro rozeznávání malých detailů, ovšem pokud se nachází v celém zorném poli, urychlují nástup zrakové únavy. Minimální hodnoty intenzity osvětlení jsou pro vnitřní prostory předepsány normou, a jsou různé podle místa, případně činnosti vykonávané při umělém osvětlení. Důležité je také, aby světelné zdroje měly správné spektrální složení, aby docházelo ke správnému vjemu barev.

3.2 Světlo z pohledu rostlin

Jak už bylo řečeno, pro rostliny je nejdůležitější fotosynteticky aktivní záření, které rostliny využívají při fotosyntéze. Při dopadání světla na listy rostlin se světlo, stejně jako při dopadu na jakoukoliv jinou hmotu, částečně odrazí, pohltí nebo projde skrz.

- Odraz (reflexe) záření závisí na povrchu listů, hladké a lesklé listy odrážejí světlo více než matné a chlupaté listy [24]. Při jednotlivých vlnových délkách je reflexe světelných paprsků různá. Největší část světelných paprsků se odrazí ve spektru zelené barvy, právě z toho důvodu je v této oblasti spektra propad citlivosti.
- Pohlcení (absorpce) záření, největší část světelných paprsků je pohlcena. Téměř veškerá pohlcená světelná energie je přeměněna na teplo, při fotosyntéze je využito jen asi 2% – 10% viditelné části spektra.
- Průchod záření (transmise) závisí především na tloušťce listů. Tenké listy mohou propustit dokonce až 40 % záření.

Rostliny jsou ve svém přirozeném prostředí vystaveny přímému slunečnímu a nepřímému rozptylovému záření. Při umělém osvětlení rostlin se snažíme vytvořit podobné podmínky, které mají rostliny v přírodě. Osvětlení může být buď čistě umělé (kultivační) používané v růstových komorách, nebo doplňkové (asimilační), které slouží k prodloužení denního osvětlení [12]. Světelné zdroje určené pro osvětlení rostlin musejí splňovat jejich požadavky na intenzitu a spektrální složení záření. Světlo slouží především jako zdroj energie pro fotosyntézu, na které závisí růst rostlin, ale je také důležité pro všechny ostatní fotobiologické procesy rostlin, které jsou společně s fotosyntézou závislé na vlnových délkách pohlceného záření.

Protože je největší účinnost fotosyntézy v oblasti červené a modré části spektra, tak někteří výrobci světelných zdrojů určených pro rostliny vyrábějí zdroje, které emitují světlo právě v těchto částech světelného spektra. Protože je ve spektru těchto zdrojů potlačena žlutozelená oblast spektra, ve které je účinnost fotosyntézy menší, tak je vyzařované světlo purpurové barvy.

Ostatní fotobiologické procesy jsou méně energeticky náročné než fotosyntéza [26]. Důležitým procesem je fotomorfogeneze, která je závislá hlavně na modré oblasti spektra. Tento proces ovlivňuje uspořádání a tvar částí rostlin [26]. Při nedostatku modrého světla jsou proto rostliny vytáhlé a mají menší a světlejší listy [26]. Velký význam má také fotoperiodismus, který je závislý hlavně na červené části spektra a má vliv na indukci květů. U některých rostlin je tvorba květů závislá na délce ozáření, kdy rostliny dlouhodobě rozkvétají při delší době ozáření než rostliny krátkodobě, které naopak rozkvétají při kratších dobách ozáření. Dalším procesem je fototropismus, který ovlivňuje směr růstu rostlin (nadzemních i podzemních částí) [26].

Podle nejnovějších výzkumných prací, které se snaží stanovit celkovou spektrální citlivost rostlin k optickému záření, má celá část viditelného záření, včetně žlutozelené části, podstatný vliv na vývoj a růst rostlin [26].

3.2.1 Vyjádření FAR veličin

Při hodnocení FAR se nepoužívá fotometrie jako je tomu při hodnocení osvětlení pro potřeby lidského oka, nýbrž se hodnotí energetickými nebo kvantovými (fotonovými) jednotkami.

Energetickou jednotkou toku FAR je watt (W_{FAR}), jednotkou intenzity ozáření je $W_{FAR} \cdot m^{-2}$. Intenzitu ozáření ve FAR spektru můžeme vypočítat ze spektrální intenzity ozáření e_λ [17] pomocí vztahu:

$$E_{FAR} = \int_{400nm}^{700nm} e_\lambda d\lambda \quad (W_{FAR} \cdot m^{-2}, W \cdot m^{-3}, m) \quad (3.7)$$

Další veličinou posuzující FAR v energetických jednotkách je dávka ozáření. Dávka ozáření udává, jaké množství FAR ve wattech dopadne na osvětlovanou plochu za určitý časový úsek. Dávku ozáření můžeme tedy vyjádřit jednotkou $W \cdot h \cdot m^{-2}$ FAR.

Hlavními fotonovými veličinami jsou fotonový tok s jednotkou $mol \cdot s^{-1}$ a intenzita fotonového toku (pro potřeby rostlin ve spektru od 400 do 700 nm) s jednotkou $mol \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$. Intenzitu ozáření (fotonového toku) ve spektru FAR můžeme vypočítat pomocí následujícího vztahu:

$$E_{mol} = \frac{1}{119,4} \int_{400nm}^{700nm} e_\lambda \lambda d\lambda \quad (mol \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}, W \cdot m^{-3}, m, m) \quad (3.8)$$

Obě hodnoty intenzit k sobě nemají konstantní poměr, protože jsou jiným způsobem závislé na spektru záření [17]. Protože světelné zdroje mají rozdílná spektra emitovaného záření, tak poměr mezi energetickými a kvantovými jednotkami leží v určitém intervalu:

$$\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} = 0,2 - 0,24 W_{FAR} \cdot m^{-2} \quad (3.9)$$

Pro návrh osvětlovací soustavy pro rostliny je potřeba znát intenzitu ozáření z kvantového i energetického pohledu.

3.2.2 Měření FAR

Posuzování fotosynteticky aktivního záření provádíme z hlediska vhodnosti pro potřeby rostlin. Měření intenzity FAR můžeme provádět přístrojem, který se nazývá μmol metr. Ten nám měří počet částic světla v rozsahu vlnových délek 400 – 700 nm [12]. Výsledkem měření je potom intenzita FAR udávaná v $\mu mol \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$. Další možností by bylo změřit hodnoty osvětlenosti pomocí luxmetru (jednotkou by byly tedy lx), a dále provést přepočty na jednotky $W_{FAR} \cdot m^{-2}$ a $\mu mol \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$.

3.2.3 Charakteristické požadavky rostlin na osvětlení

Rostliny mají specifické požadavky hlavně na spektrum a intenzitu záření, dále záleží také na úhlu dopadu záření.

Největším rozdílem oproti požadavkům lidského oka je spektrální citlivost rostlin, která se může během denního cyklu znatelně měnit. Požadavky na spektrum závisí také na druhu rostliny a na její fázi vývoje. Na vývoj a růst rostlin má jistý vliv celá část viditelného záření, ovšem pro

rychlost fotosyntézy, a tím pádem i rychlost růstu rostliny, je nejpodstatnější dostatečná intenzita záření v modré a červené části spektra FAR.

Rostliny jsou schopné během dne přijmout pouze určité množství energie rozložené v čase. Proto je z důvodu střídání katabolických a anabolických procesů, potřeba střídat během denního cyklu fáze ozáření. Dostatečná intenzita záření je také různá pro jednotlivé druhy rostlin. Rostliny můžeme podle požadavků na ozáření rozdělit podle [12] do tří skupin:

- rostliny s vysokými požadavky – ozářenost více než $150 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ (to odpovídá v energetických jednotkách asi $75 \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
- rostliny se středními požadavky – ozářenost 40 až $50 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ (to odpovídá v energetických jednotkách rozmezí 20 až $25 \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
- rostliny s nízkými požadavky – ozářenost méně než $40 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ (to odpovídá v energetických jednotkách přibližně $20 \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

Jen pro představu ozářenost $6 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ odpovídá přibližně 500 lx [1].

Dalším požadavkem je vhodný úhel dopadu záření na rostliny, neboť díky povrchovým vlastnostem většiny rostlin dochází k odrazu určité části dopadajícího záření. K nejvyšší absorpci samozřejmě nastává při kolmém dopadu záření na povrch rostliny, při zvyšování úhlu od kolmice dopadajícího záření se absorpce snižuje a při úhlech 50° od kolmice je již většina dopadajícího záření odražena nebo rozptýlena do okolí [17].

4 DOSAHOVANÉ PARAMETRY SVĚTELNÝCH ZDROJŮ

V předchozí kapitole byly shrnuty základní požadavky rostlin na světelné zdroje. Tato část práce bude věnována elektrickým a světelně-technickým parametrům světelných diod, které by mohly být vhodné pro ozařování rostlin. Na úvod bude stručně popsán princip funkce světelných diod (LED), jejich druhy a význam jednotlivých elektrických a světelných parametrů LED. V poslední části kapitoly budou uvedeny dosažované parametry LED.

4.1 Princip funkce LED

Světelné diody jsou označovány LED z anglického názvu Light Emitting Diode (což v překladu znamená dioda vyzařující optické záření). U LED je využíván princip elektroluminiscence, při kterém je z PN přechodu vyzařováno optické záření. PN přechod je rozhraní materiálů typu N a typu P. V polovodiči typu N je nevlastní vodivost elektronová, v polovodiči typu P je nevlastní vodivost děrová. Nevlastní vodivost není teplotně závislá (je dána pouze množstvím příměsí dodaných do polovodiče), vlastní vodivost je naopak teplotně závislá [2]. Princip činnosti svítivých diod je v podstatě stejný jako u běžných usměrňovacích diod. Pokud přiložíme elektrické napětí v propustném směru, tak dochází k injekci minoritních nosičů elektrického náboje přes PN přechod [2]. Při průchodu elektrického náboje přes přechod dochází k rekombinaci elektronů s děrami, což znamená, že volné elektrony ztrácejí energii a dostávají se na oběžné dráhy v atomech. Tato energie je vyzářena ven ve formě fotonů. Protože se elektrony pohybují jen v určitých energetických hladinách, tak i vyzářený foton může mít pouze určité hodnoty energie, tzn. energie je vyzářena s určitou vlnovou délkou. Záření produkované elektroluminiscencí tedy obsahuje pouze určitý malý rozsah vlnových délek, který závisí na použité látce PN přechodu. U LED se můžeme setkat se dvěma základními typy přechodů, homogenními a heterogenními:

- Homogenní přechody jsou nejjednodušším typem PN přechodů. Jsou vytvářeny z jednoho typu materiálu, který je na obou stranách dotován příměsími [2]. LED s homogenními přechody byly první, které se začaly používat.
- Heterogenní přechody se skládají ze dvou různých polovodičových materiálů (např. GaAs a AlGaAs). Heterogenní přechody obsahují dva a více přechodů PN. Jsou výkonnější a složitější než diody s homogenním přechodem, tím pádem také dražší.

LED můžeme dělit například podle barvy emitovaného záření. LED mohou vyzařovat záření v infračervené, viditelné, nebo ultrafialové oblasti. Barvu vyzařovaného optického záření určuje vzájemné zastoupení jednotlivých složek materiálů a množství provedené dotace [2]. Nejjednodušší je výroba červené LED, protože červené světlo má nejmenší energii. Tyto diody se vyrábějí na bázi sloučeniny, která obsahuje 35 % galiiumarsenidu a 65 % fosforu (ozn.: $\text{GaAs}_{0,35}\text{P}_{0,65}$) [2], emitované světlo má pak vlnovou délku kolem 635 nm. Zelené diody se vyrábějí na bázi sloučeniny GaP, emitované záření má potom vlnovou délku kolem 560 nm. Modré diody se vyrábějí na bázi SiC nebo GaN, jejich emitované záření je kolem 470 nm.

4.1.1 Bílé LED

Bílé LED jsou nejmladším typem svítivých diod. Jejich význam vzrostl s vývojem supersvítivých diod [2]. Odstín bílého optického záření je udáván barevnou teplotou. Protože LED emitují světlo, které obsahuje pouze určitý malý interval vlnových délek, nemůžeme přímo emitovat bílé světlo. Generování bílého světla můžeme docílit buď skládáním červeného,

zeleného a modrého světla pomocí vícebarevných LED, nebo použitím LED a luminoforu [2]. Luminofor je látka měnící vlnovou délku vyzařovaného světla (např. část modrého světla je přeměněna na žluté a kombinace těchto dvou barev je lidským okem vnímána jako bílé světlo [25]).

Při vytváření bílého světla pomocí vícebarevných LED se používají RGB moduly (čipy). RGB diody se vyrábějí s šesti případně se čtyřmi vývody. V provedení se čtyřmi vývody mají buď společné katody, nebo společné anody [2]. Bílé světlo je tedy získáno složením červeného, zeleného a modrého světla. Využívají se následující kombinace barev:

- modrá – zelená – červená
- modrá – zelená – červená – žlutá

Při vytváření bílého světla pomocí LED a luminoforu se nejčastěji používají tyto kombinace:

- modrá LED a žlutý luminofor
- ultrafialová LED a červený – zelený – modrý luminofor
- Kombinace modré a červené LED a luminoforů

Nejčastějším způsobem z výše uvedených bývá kombinace modré LED a luminoforu. Optické záření pak může mít odstín od nažloutlé až po namodralou barvu v závislosti na použitém luminoforu.

4.2 Parametry LED

Parametry světelných diod můžeme rozdělit na elektrické, do kterých patří např. jmenovité napětí, jmenovitý příkon, proud diodou, a parametry světelně technické, do kterých patří celkový zářivý tok, index podání barev, teplota chromatičnosti atd.

Při popisování parametrů světelných diod je potřeba úvodem říct, že u světelných diod dochází trvale k velmi dynamickému rozvoji. Zlepšují se hodnoty měrného výkonu, a také se zvyšuje horní hranice příkonu jednotlivých čipů, ze kterých jsou diodová svítidla sestavena. Velmi zajímavé je tempo zavádění dosažených výsledků v laboratorních podmínkách do sériové výroby, kdy doba mezi oznámením a aplikováním dosažených výsledků do sériové výroby bývá v řádech měsíců.

Například firma Cree, oznámila (duben 2014) u bílých světelných diod rekordní hodnotu měrného výkonu v laboratorních podmínkách $303 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ při napájení proudem 350 mA a náhradní teplotě chromatičnosti 5150K [22]. Ovšem je nutné zdůraznit, že této hodnoty bylo dosaženo v laboratorních podmínkách při napájení menším proudem, než je proud jmenovitý, dosažované hodnoty měrných výkonů jsou v běžných podmínkách nižší.

Spolu se zvyšováním účinností LED dochází i ke zlepšení odolnosti proti působení vyšší teploty a vlhkosti. Teplota má velký vliv na nejdůležitější parametry LED, proto je nutné při navrhování svítidla, s těmito světelnými zdroji, zajištění optimální pracovní teploty PN přechodu. Při překročení optimální teploty PN přechodu dochází velmi rychle ke snižování životnosti LED a také to má za následek rychlejší pokles jejího světelného toku [13]. Je tedy potřebné při návrhu svítidla zvolit vhodné konstrukční řešení a použití chlazení, aby nebyly tyto mezní teploty překročeny a aby tím pádem nedocházelo ke zhoršování parametrů použitých světelných zdrojů.

Světelné diody pracují při velmi malém napájecím napětí, při kterém nehrozí nebezpečí při dotyku živých částí [13]. Ovšem zdroje ve svítidlech sestavené z řady jednotlivých LED obsahují

předřadné systémy, aby je bylo možné připojit přímo do elektrické sítě 230V, proto musí splňovat bezpečnostní požadavky jako běžné elektrické spotřebiče.

4.2.1 Elektrické parametry

Mezi udávané elektrické parametry LED patří jmenovitý proud, to je proud, při kterém dioda emituje záření. U výkonových LED, použitelných pro osvětlování rostlin, se tento proud pohybuje od 1 do 3 A. Mezi další parametry patří jmenovité napětí, to závisí na použitých příměsích (na barvě emitovaného záření). Jmenovité napětí je od 2 do 3 V, u modrých a bílých diod i o něco více. Velmi důležitým parametrem je jmenovitý příkon LED. Ten dosahuje v současné době jednotek wattů, u výkonových LED se příkony pohybují kolem 10W. Sestavením jednotlivých diod do bloku dostaneme světelný zdroj s podstatně vyšším příkonem, a tedy i výkonem

4.2.2 Světelně-technické parametry

Mezi nejdůležitější udávané světelně technické parametry LED patří světelný tok zdroje, měrný výkon, životnost zdroje, vlnová délka emitovaného záření u barevných LED, a náhradní teplota chromatičnosti a index podání barev u bílých LED.

4.2.2.1 Světelný tok zdroje

Světelný tok nám ve fotometrii reprezentuje světelný výkon zdroje. Jednotkou jsou lumény (lm). Je to tedy vedle měrného výkonu jeden z nejdůležitějších udávaných parametrů LED.

4.2.2.2 Měrný výkon

Měrný výkon charakterizuje efektivnost světelných zdrojů. Vyjadřuje podíl vyzařovaného světelného toku a příkonu (jednotkou je tedy $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$). Měrný výkon nám tedy charakterizuje efektivnost přeměny elektrické energie na světelnou energii

4.2.2.3 Životnost zdroje

Tento parametr je udáván na obalech nebo v katalogích výrobců světelných zdrojů. Udává se v hodinách, a znázorňuje, kolik hodin vydrží svítit polovina určitých světelných zdrojů, jejichž světelný tok klesne na 70 % původní hodnoty. U LED zdrojů udávají výrobci střední dobu života až 50 000 hodin.

Životnost LED zdrojů světla ovlivňuje celá řada faktorů. Mezi nejdůležitější patří odvod tepla, použité LED čipy a další elektronické součástky, které jsou součástí LED svítidel, a dodržení provozních podmínek.

4.2.2.4 Index podání barev

Vjem barvy předmětu je dán hlavně spektrálním složením světla vyzařovaného ze zdroje, ale také spektrálním činitelem odrazu pozorovaného předmětu. Za normální vjem barvy se považuje barevný vzhled předmětů na denním (přírodním) světle nebo na žárovkovém světle [15]. Proto při osvětlování předmětů světelnými zdroji s výrazně odlišným spektrálním složením, než mají teplotní zdroje světla (např. výbojové zdroje), může docházet k podstatnému zkreslení vjemu barev osvětlovaných předmětů [15].

Tento vliv spektrálního složení světla zdrojů na barevný vjem osvětlovaných předmětů nám charakterizuje podání barev. K číselnému rozdělení podle kvality podání barev jednotlivých

světelných zdrojů nám slouží právě index podání barev R_a . Index podání barev nám tedy vyjadřuje míru shodnosti vjemu barvy předmětů osvětlených určitým zdrojem světla a barvy týchž předmětů osvětlených smluvním zdrojem světla za stanovených podmínek pozorování [15]. Hodnocení zdrojů světla se provádí pomocí metody číselného vyjádření rozdílu ve vjemu barvy na vybraném souboru osmi až čtrnácti barevných vzorků, při osvětlení zkoumaným a smluvním zdrojem světla. Výsledná hodnota indexu podání barev R_a může nabývat od hodnot 0 do 100. Nejvyšší hodnota $R_a = 100$ odpovídá nejuvěřejšímu vnímání barev. Toho je dosaženo při osvětlení předmětů denním světlem a při osvětlení teplotními zdroji (žárovka). Naopak nejnižší hodnota $R_a = 0$ nastává např. při osvětlení předmětu monochromatickým žlutým zářením nízkotlaké sodíkové výbojky, kdy nejsme schopni vůbec rozlišit barvy. Při osvětlení interiéru se v současné době požaduje, aby světelné zdroje měly hodnotu $R_a > 80$ [15]. Při osvětlování rostlin záleží na tom, jestli budeme rostliny osvětlovat v růstové komoře nebo ve skleníku, kde nám podle mě tolik nezáleží na R_a , a volíme proto osvětlení se spektrálním složením světla vhodným pro fotosyntézu a další pochody uvnitř rostliny. Nebo zda chceme přisvětlovat rostliny uvnitř interiéru, kde je podle mě vhodné, přihlídnout při výběru světelného zdroje k jeho R_a , aby nebyla narušena zraková pohoda pozorovatele.

4.2.2.5 Náhradní teplota chromatičnosti

Teplota chromatičnosti se používá k popisu barvy či k popisu vystižení barevných vlastností vyzařovaného světla světelnými zdroji. Teplota chromatičnosti (T_c) je rovna teplotě absolutně černého tělesa, jehož záření má stejnou chromatičnost jako uvažované záření [15]. Teplota chromatičnosti je udávána v kelvinech (K). U zdrojů, jejichž křivka spektrálního složení obsahuje prudké změny (výbojové zdroje, LED), se používá tzv. náhradní teplota chromatičnosti T_n , která přibližně popisuje barvu zdroje. Protože LED nejsou teplotní zdroje, tak jejich náhradní teplota chromatičnosti nemá nic společného s jejich teplotou. Náhradní teplota chromatičnosti je definována teplotou chromatičnosti odpovídající bodu, který leží na čáře teplotních zářičů nejbližší bodu, jenž znázorňuje chromatičnost posuzovaného svítidla [15].

4.3 Dosažované parametry LED

Dostupný sortiment výkonových diod je veliký, ovšem velká část je orientována na osvětlení pomocí bílých LED. Jenomže bílé LED nám emitují poměrně málo FAR záření v červené a modré oblasti spektra, proto kromě bílých potřebujeme ve svítidlech pro osvětlení rostlin i LED, které nám budou emitovat záření v oblastech spektra, na které mají rostliny nejvyšší citlivost, tzn. červené a modré LED. V této oblasti již není výběr diod tak velký a dosažované parametry jsou u největších světových výrobců velmi podobné.

Pokud chceme dosáhnout spektrálního složení světla, které se bude co nejvíce podobat spektrální citlivost rostlin, tak se podle mě jeví jako nejvhodnější kombinace teplé bílé LED, aby byla zastoupena alespoň minimální intenzitou celá část viditelného spektra, spolu s červenou a modrou LED, pro posílení intenzity těchto částí spektra, které má největší přínos pro fotosyntézu.

4.3.1 Bílé LED

Jak již bylo zmíněno, tak bílých LED je na trhu velký výběr. Většinou jsou realizovány použitím modré diody a žlutého luminoforu. Vyzařované světlo může být v oblasti chladné bílé (s náhradní teplotou chromatičnosti od 5000 K do 10 000 K), v oblasti neutrální bílé (s náhradní teplotou chromatičnosti od 3700 K do 5000 K) nebo v oblasti teplé bílé (s náhradní teplotou chromatičnosti od 2600 K do 3700 K). Index podání barev u těchto diod dosahuje u chladnějších

odstínů 70 až 80, u teplejších odstínů více než 80, což znamená, že mají velmi dobré podání barev. Měrný výkon se u nejlepších LED pohybuje kolem $180\text{--}200\text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$, ovšem je potřeba říci, že takových hodnot měrných výkonů je dosažováno u nízkopříkonových LED, při nízkých provozních teplotách. U výkonových LED se při napájení v oblasti jmenovitých proudů dostáváme v reálu tak na $90\text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ až $120\text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$. Udává se, že LED napájené proudem o poloviční hodnotě než je jich jmenovitý napájecí proud dosahují až o 60% vyšší účinnosti přeměny elektrické energie na světelnou, než při napájení maximálním jmenovitým proudem. Je to způsobeno tím, že při průchodu menšího proudu, než je proud jmenovitý, dochází k menšímu oteplení přechodu, a tím pádem dosahují LED většího měrného výkonu. Proto je nutné z LED odvádět ztrátové teplo.

Světelný výkon dosahuje u teplých odstínů LED, s příkonem 10W a napájených jmenovitým proudem 3 A, až 1000 lm. Pro objektivní posouzení vhodnosti pro osvětlování rostlin bychom potřebovali znát hodnotu zářivého toku v $\text{W}_{\text{FAR}}\cdot\text{m}^{-2}$. Tento údaj bohužel výrobci světelných diod neuvádějí, proto bychom jej museli stanovit výpočtem nebo měřením. Pokles svítivosti o 30% nastává podle údajů výrobců za 50 000 pracovních hodin a maximální teplota přechodu PN, udávána u těchto LED dosahuje až 150°C [20] (teplota při které nedojde k zničení LED).

4.3.2 Modré a červené LED

LED emitující modré světlo bychom mohli pro osvětlování rostlin použít, spolu s Bílou LED, pro posílení intenzity záření v modré části spektra. Rostliny mají největší citlivost v modré oblasti spektra na vlnové délky kolem 450 nm. Proto potřebujeme LED, která bude emitovat záření na této vlnové délce. Z dostupné nabídky se jako nejvhodnější jeví LED Royal Blue emitující záření o vlnové délce 450 nm, případně bychom mohli použít LED Blue, s vlnovou délkou záření 465 nm.

Pro posílení červené části spektra můžeme použít červené LED. Rostliny mají největší citlivost v červené oblasti spektra na vlnové délky kolem 650 nm. Proto je pro nás vhodná LED, která bude emitovat záření blízké se této vlnové délce. Z běžně dostupné nabídky se jako nejvhodnější jeví Red LED, emitující světlo o vlnové délce 630 nm.

Červené a modré LED nabízejí výrobci většinou se jmenovitým proudem 1 A, tzn., že mají menší příkon než bílé výkonové LED a tedy i menší světelný tok. Červené a modré LED bychom použili v kombinaci s bílými LED, sloužily by tedy pro posílení intenzity v červené a modré části spektra, proto by nám nevadilo, že mají menší světelný tok.

4.4 Chlazení diod

Při provozu LED vzniká velké ztrátové teplo na malé ploše, a tím dochází ke značnému oteplení PN přechodu. To je velmi nepříjemný jev, neboť se zvyšující se teplotou klesá pravděpodobnost vzniku zářivé rekombinace a tím pádem nám klesá světelný výkon. Vysoká teplota má také nepříznivý vliv na životnost LED a na účinnost luminoforu, který transformuje záření přechodu (modré) do bílé barvy. Proto je nutné tohle ztrátové teplo odvádět, aby nedocházelo ke zhoršení parametrů diod. Teplota na diodě je ovlivňována těmito faktory:

- Procházejícím proudem
- Provedením systému pro odvod tepla
- Teplotou okolního prostředí

U světelných diod platí, že čím větší je procházející proud, tím větší je teplo vznikající na polovodičovém PN přechodu. To znamená, že u výkonových diod jsou větší požadavky na odvod tepla. Při odvádění tepla jsme limitováni teplotou okolního prostředí a také vlastním technickým provedením systému pro odvod tepla [25]. Nejjednodušším řešením pro odvod tepla je použití chladiče z hliníku, který odvede teplo přes žebrování do okolního prostředí [25]. Další a efektivnější možností odvodu tepla je použití tepelného výměníku, pomocí kterého budeme ohřívat chladicí médium (např. vodu). Výhodou tohoto druhu chlazení je možnost využití tohoto ztrátového tepla. Při použití LED svítidel na ozařování rostlin se nabízí využití tohoto tepla k ohřívání vody, kterou budeme rostliny zalévat. Při použití dobrého chlazení můžeme zdroj světla více přiblížit k rostlině, čímž se záření dostane lépe i ke spodním částem rostliny

5 SVÍTLIDLO ZALOŽENÉ NA LED TECHNOLOGII POUŽITELNÉ PRO OSVĚTLOVÁNÍ ROSTLIN

V předchozí kapitole byly popsány dosahované elektrické a světelně-technické parametry LED, které jsou vhodné pro použití ve svítilně, určeného pro ozařování rostlin. Tato kapitola bude obsahovat základní požadavky, které by mělo svítilno se světelnými zdroji LED splňovat.

5.1 Svítilno založené na technologii LED

Při návrhu svítilny určeného pro ozařování rostlin se musíme nejprve rozhodnout, k jakému účelu bude svítilno sloužit. Zda se bude jednat pouze o doplňující osvětlení (asimilační), které bude sloužit pouze jako doplněk slunečního záření, nebo zda budeme navrhovat svítilno pro růstovou komoru, kde bude toto svítilno jediným zdrojem záření pro rostliny.

V oboru pěstování rostlin se svítilna zajišťující umělé ozařování rostlin využívají nejčastěji jako doplněk slunečního záření. Například pomocí pěstivelských lamp se prodlužuje den ve sklenicích, a tím pádem se zvyšuje rychlost růstu rostlin a dozrávání plodů. Dále se pak přisvětlování umělým osvětlením využívá v botanických sklenicích, protože některé exotické rostliny potřebují k životu vyšší intenzitu světla, než se vyskytuje v našich klimatických podmínkách. Další uplatnění doplňujícího umělého osvětlení můžeme nalézt například při pěstování pokojových rostlin v případech, kdy není intenzita dopadajícího slunečního záření dostačující.

Nicméně v této práci bych se spíše zabýval svítilně, které by bylo pro rostliny jediným zdrojem záření, tzn. svítilně kultivační, použitelnou v pěstební komoře. Potřebná intenzita záření bude záležet na druhu rostliny a bude se pohybovat od 20 do 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ což v energetickém měřítku odpovídá přibližně 5 až 80 $\text{W}_{\text{FAR}}\cdot\text{m}^{-2}$ [17]. Musíme se dále rozhodnout, jak velký prostor budeme svítilně ozařovat (rozměr pěstební komory), v jaké vzdálenosti bude umístěna ozařovaná rovina od svítilny a v neposlední řadě jaké vhodné světelné zdroje použijeme.

V dnešní době je na trhu velké množství světelných zdrojů, z nichž většina může být vhodná k osvětlování pěstebních (fytotronových) komor. Tyto světelné zdroje, které bychom mohli použít, musí podle [17] splňovat určitá kritéria:

- Nízká energetická náročnost
- Vysoká účinnost přeměny el. energie na světlo
- Vhodné, nejlépe regulovatelné spektrum
- Kompaktní provedení, nejlépe plošné
- Možnost efektivního odvodu odpadního tepla
- Regulace výkonu

Nejvhodnější dostupnou technologií se jeví technologie LED. Světelné diody zažily v posledních letech velký technologický pokrok, a v dnešní době již mají pevné zastoupení ve všech oblastech osvětlování. Pro účely pěstebních komor nabízejí z dostupných světelných zdrojů nejlepší řešení, neboť mají jednu z nejvyšších účinností přeměny el. energie na světlo, u průmyslového využití v osvětlování zpravidla okolo 100 $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$, z pohledu přeměny

na potřebné záření je tato účinnost ještě větší, dále díky široké nabídce barevných LED není problém vytvořit spektrum přesně na míru pro potřeby konkrétních rostlin. Ze všech světelných zdrojů mají nejvíce kompaktní provedení s kontaktním odvodem tepla [17], které by mohlo být využito, jak již bylo zmíněno, třeba k ohřevu zálivky. Díky vysoce účinným předradníkům je možné docílit jak přesnou úroveň intenzity ozáření, tak regulaci každé „barvy“ zvlášť vytvořit potřebné spektrum výsledného záření.

5.1.1 Výběr vhodných světelných diod

Jak jsem popisoval dříve, tak pokud chceme dosáhnout spektrálního složení světla, které se bude co nejvíce podobat spektrální citlivost rostlin, tak se podle mě jeví jako nejvhodnější kombinace teplé bílé LED, aby byla zastoupena alespoň minimální intenzitou celá část viditelného spektra, spolu s červenou a modrou LED. Co se týče zdroje pro posílení modré části spektra, tak můžeme použít například LED Royal blue emitující záření o vlnové délce 450 nm, případně LED blue s vlnovou délkou záření 465 nm. Pro posílení červené části spektra můžeme použít red LED, emitující světlo o vlnové délce 630 nm.

Použit by se tedy dala LED teplá bílá se jmenovitým proudem 3 A, červené a modré LED slouží pro posílení intenzity v červené a modré části spektra, proto bychom mohli použít LED s menším světelným tokem a tedy i menším příkonem, například LED se jmenovitým proudem 1 A.

5.1.2 Svítidlo

Světelné zdroje (LED) by samy o sobě nevyhovovaly našim potřebám pro ozařování rostlin, neboť nemusejí mít příliš vhodné rozdělení světelného toku, jistě by na ně nevhodně působily vlivy prostředí (hlavně vlhkost) a dále neobsahují jednoduché prostředky pro přímé připojení do el. obvodu [9]. Z těchto důvodů musíme světelné zdroje umístit do svítidla.

Světelné zdroje LED mají většinou poměrně velké vyzařovací úhly (např. LED zdroje použité v prototypovém svítidle, o kterém se zmíním později, mají v závislosti na typu, vyzařovací úhel $90^\circ - 120^\circ$ [19]). Jejich světelný paprsek je tedy třeba pro celou řadu aplikací dále formovat pomocí sekundárních optických členů [19]. Vlastnosti přídavné optiky můžeme zjistit z diagramu svítivosti, který ovšem nebývá v katalogu vždy uveden. V katalogu bývá většinou uveden vyzařovací úhel FWHM (Full Width Half Maximum [21], v české literatuře: poloviční vyzařovací úhel [2]), To je v diagramu svítivosti vrcholový úhel kužele s osou v optické ose zdroje (kde je maximální svítivost I_0), jehož povrchové přímky protínají body křivky svítivosti s $I_0/2$ [14].

Svítilno by tedy mělo sloužit k ochraně světelných zdrojů před okolním prostředím, k připojení ke zdroji elektrické energie, případně k úpravě rozložení světelného toku.

Kromě těchto základních požadavků by mělo svítidlo umožňovat jednoduchou montáž a údržbu, musí vyhovovat z hlediska ochrany před nebezpečným dotykovým napětím a před vniknutím cizích předmětů a vody [9]. To už jsou ale požadavky, které by bylo potřeba řešit až při samotné konstrukci svítidla, takže se jimi zde nebudu dále zabývat.

Svítilna se obecně rozdělují na části konstrukční, světelně činné a elektrické. Mezi konstrukční části patří především vlastní těleso svítidla, kryty a veškerý spojovací materiál (šrouby apod.). Části světelně činné jsou ty části, které slouží ke změně rozložení světelného toku

nebo ke změně spektrálního složení světla. Do elektrických částí svítidla pak řadíme veškeré vodiče, svorkovnice, předřadníky, patice, usměrňovače filtry atd. [9]

5.1.2.1 Konstrukce svítidla

Nejprve je potřeba zvolit rozměry svítidla (pěstební komory), dále pak zvolit v jaké vzdálenosti bude ozařovaná rovina pod svítidlem. Pro dosažení rovnoměrného ozáření je potřeba rozdělit svítidlo na větší počet bodů, kde do každého bodu umístíme vždy dvojici či trojici LED (bílá – modrá nebo bílá – modrá – červená), záleží, jestli budeme potřebovat posílit modrou i červenou část spektra. Pro napájení diod budou potřeba regulovatelné napájecí zdroje. Nejvhodnější bude použit pro každou barvu vlastní regulovatelný zdroj, aby bylo možné upravovat spektrální složení světla dle potřeby.

5.2 Konstrukce prototypového svítidla s LED

Protože součástí práce je ověření teoretických předpokladů na již vyvinutých svítidlech v laboratoři světelné techniky, tak se zde stručně popíše konstrukci a parametry již sestaveného prototypového svítidla.

Prototypové svítidlo LED určené pro osvětlování rostlin, na kterém byly měření ověřovány teoretické předpoklady, vzniklo za podpory projektu regionálního výzkumného centra č. CZ.1.05/2.1.00/01.0014 a projektu č. FR-TI3/383 Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky [18]. Celkově byly ke dni 14.11.2012 navrženy, zrealizovány a změřeny 3 prototypy svítidel, které jsou určeny pro osvětlování rostlin [18]. Kromě svítidla LED bylo sestaveno svítidlo se sirnou výbojkou a zářivkové svítidlo.

Rozměrová jednotka pěstební komory s použitím LED byla zvolena 600mm (rozměr svítidla je tedy 600x600 mm, rozměr opticky aktivní části svítidla pak 590x590 mm).

Jako světelné zdroje pro toto svítidlo byly vybrány světelné diody výrobce CREE z řady XM-L a XP-E. Jejich napájení obstarávají regulovatelné spínané proudové zdroje výrobce Mean Well z řady LPF a HGL [18]. Svítidlo je navrženo pro osvětlování rostlin ze vzdálenosti 1500 až 2000 mm, kde by toto svítidlo mělo na plný výkon zabezpečovat minimální intenzitu ozáření $300 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.

Svítilno je vybaveno dvěma typy světelných diod. Jako hlavní světelný zdroj prototypového svítidla byla použita LED Warm White (teplá bílá) v typovém provedení XM-L. Pro posílení záření v modré části spektra byla použita modrá LED Royal Blue v typovém provedení XP-E. Prototypové svítidlo tedy neobsahuje žádné světelné zdroje pro posílení červené části spektra.

Pro odvod tepla bylo nejprve uvažováno s vodním dvouokruhovým chlazením. Při použití vodního dvouokruhového chlazení bychom mohli využít odpadní teplo k ohřevu zálivky, ale jedná se pouze o prototypové svítidlo pro ověření teoretických předpokladů, proto bylo použito v závěrečné fázi vývoje svítidla chlazení za pomoci chladiče s aktivní ventilací.

5.2.1 Parametry světelně činných částí svítidla:

- Světelné zdroje – Royal Blue diody: 14x LED CREE XP-E, 1 A
- Světelné zdroje – Warm White diody: 26x LED CREE XM-L (teplá bílá 2600 až 3700 K), 3 A
- Použitá optika: 40x optika typ 10199

5.2.2 Parametry elektrických a konstrukčních částí svítidla:

- Předřadný systém pro Royal Blue diody: Mean Well LPF-60D-24 (24 V; 0,25 – 2,5 A; max. 60 W)
- Předřadný systém pro Warm White diody: Mean Well HLG-240H-48B (48 V; 0,5 – 5 A; max. 240 W)
- Plošné spoje - Royal Blue diody: 14x DPS – DPS TR20-1M
- Plošné spoje - Warm White diody: 26x DPS – DPS TR86-1
- Držák optiky: 40x držák 10673 – white – pro XM-L a XP-E

5.3 Měření na prototypovém svítidle

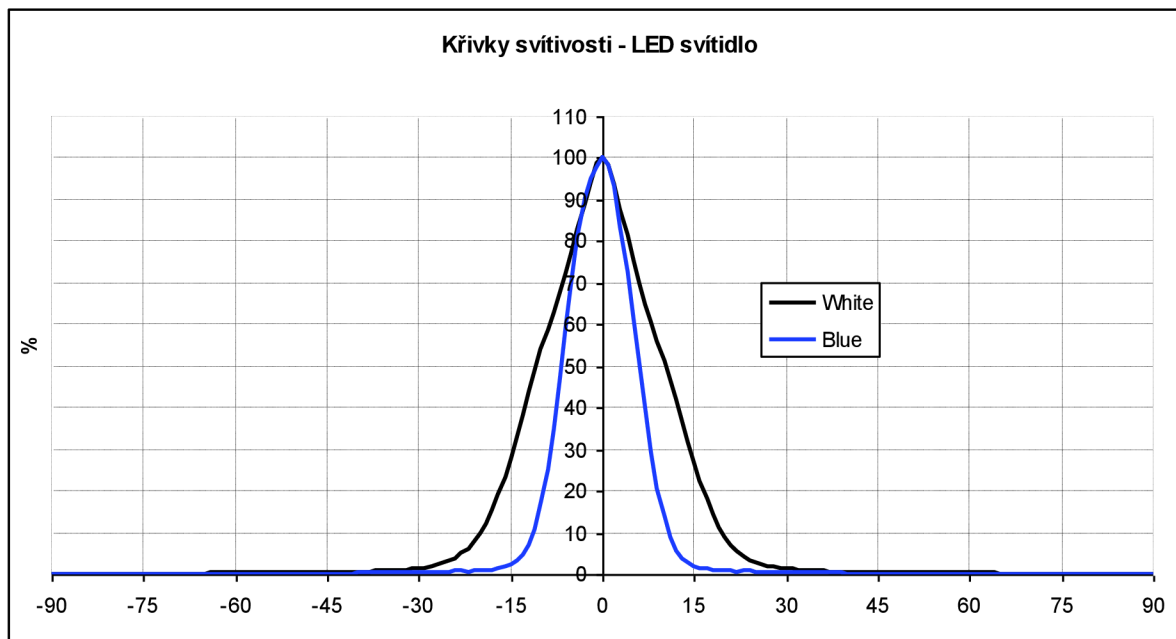
V rámci měření elektrických a světelně-technických vlastností prototypového svítidla LED byly měřeny následující parametry [18]:

- Křivky svítivosti
- Oteplení jednotlivých částí svítidla
- Křížové charakteristiky
- Příkon svítidla v závislosti na napájecím napětí
- Spektrum
- Osvětlenost
- Intenzita ozáření v jednotkách $W_{FAR} \cdot m^{-2}$ a $\mu mol \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$

5.3.1 Křivky svítivosti

Křivky svítivosti se zakreslují v polárních nebo pravoúhlých souřadnicích, v našem případě jsou křivky svítivosti zobrazeny v pravoúhlých souřadnicích a svítivost je uvedena relativních hodnotách (%), kde nejvyšší naměřená hodnota svítivosti v ose svítidla je považována za 100 % a k této hodnotě jsou vztaženy všechny další naměřené hodnoty.

Křivky svítivosti byly měřeny na goniofotometru s fotometrickou vzdáleností 8760 mm pomocí luxmetru Krochmann Radiolux 111. Měření bylo prováděno od -90° do 90° po 1° v rovinách C-90, C-75, C-60, C-45, C-30, C-15, C0, C15, C30, C45, C60, C75 a C90 [18]. Křivky svítivosti jsou zobrazeny na Obr. 5-1.



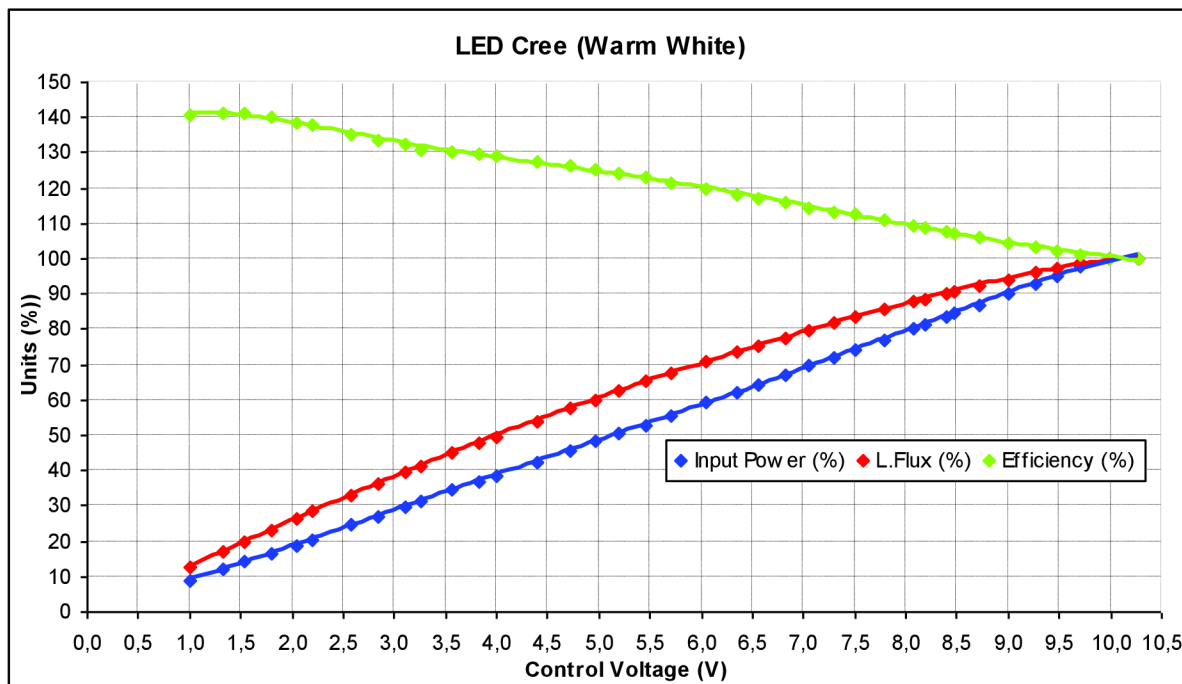
Obr. 5-1 Křivky svítivosti LED svítidla (Warm White, Royal Blue LED) [18]

Podle křivek svítivosti, má svítidlo vyzařovací úhel FWHM 22° pro Warm White LED a 10° pro Royal Blue LED. Můžeme proto podle [16] říct, že se jedná o svítidlo přímé (naprostá většina vyzařovaného světelného toku směřuje do dolního poloprostoru), s hlubokým až koncentrovaným tvarem křivek svítivosti. Vyzařovací úhly jsou dány použitou optikou, která je pro oba typy LED odlišná. Vyzařovací úhly pro oba typy LED odpovídají přibližně údajům uvedených v katalogu výrobce, kde podle [19] má mít optika použitá pro LED Warm White vyzařovací úhel FWHM 19° a optika použitá pro LED Royale Blue 10° .

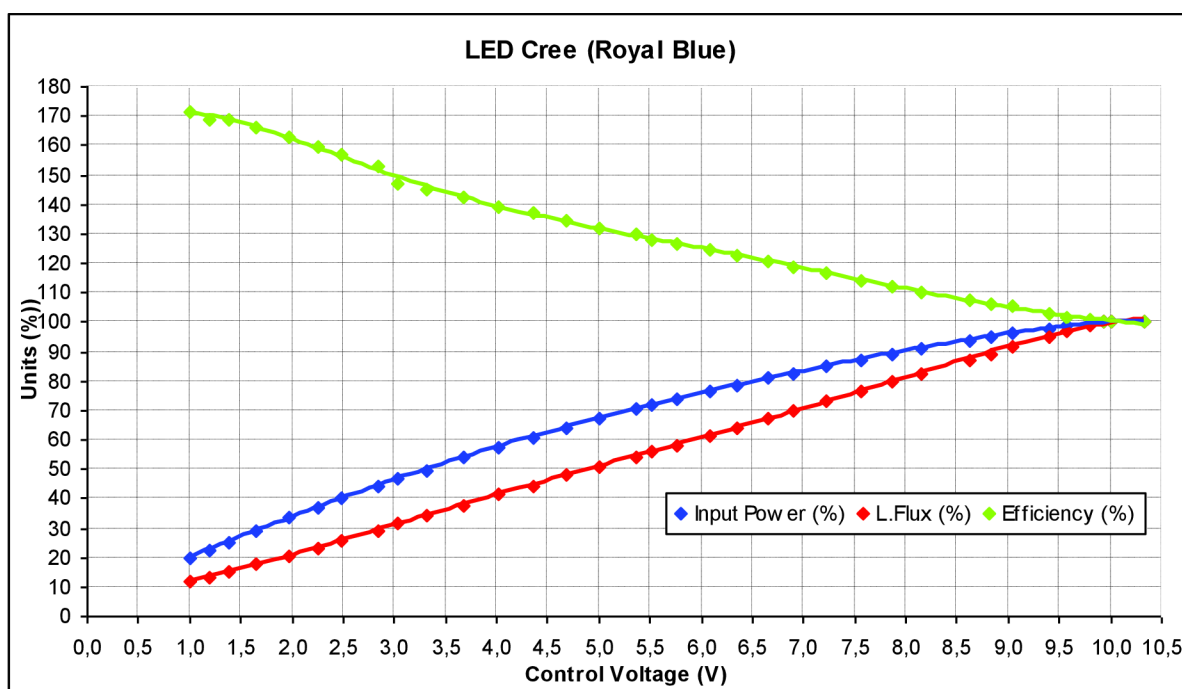
5.3.2 Křížové charakteristiky

Křížové charakteristiky byly měřeny za použití multimetru Agilent U1251A, luxmetru Lutron LX-105 a měřiče spotřeby VoltCraft Energy Logger 4000F. Řídící signál 1-10 V byl vytvářen napájecím zdrojem Manson EP-613 [18].

Bylo nutné naměřené hodnoty převést na relativní hodnoty (%). Naměřené hodnoty veličin při maximálním řídicím signálu (10 V) jsou považovány za 100 % a k této hodnotě jsou vztaženy všechny další naměřené hodnoty. Křivky zobrazené v křížových charakteristikách se musejí protínat v bodě, kde hodnota osy x a y dosahuje 100 %. Nicméně je nutné podotknout, že LED Warm White mají nominální hodnotu proudu 3 A. Při hodnotě řídicího napětí v max. hodnotě (10 V) prochází světlenou diodou proud o velikosti 2,5 A, což představuje pouze 83% jmenovitého proudu diodou [18]. Nemůže tedy dojít k tomu, že je dioda proudově přetížena. Naopak LED Royal Blue mají nominální hodnotu proudu 1 A. Při hodnotě řídicího napětí v max. hodnotě (10 V) prochází světlenou diodou proud o velikosti 1,25 A, což představuje 125% jmenovitého proudu diodou [18]. To tedy znamená, že při hodnotě řídicího napětí větší jak 8 V dochází k proudovému přetěžování diod a přidružený řídicí systém tedy musí zajistit, aby nebyla překročena hodnota řídicího napětí 8 V.



Obr. 5-2 Křížové charakteristiky LED (Warm White) [18]



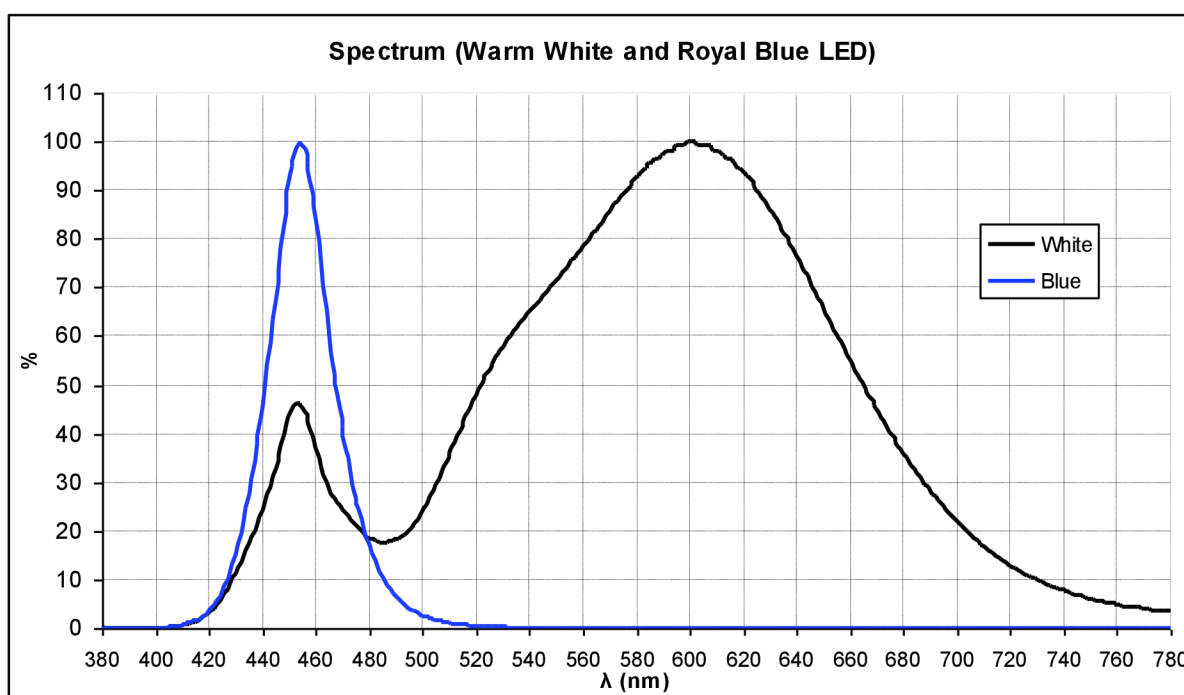
Obr. 5-3 Křížové charakteristiky LED (Royal Blue) [18]

V křížových charakteristikách obou druhů LED, použitých ve svítidle, můžeme vidět, že elektrický příkon (Input Power) má v závislosti na řídicím napětí téměř lineárně vzrůstající průběh. Podobný průběh má také světelný tok (L.Flux), který roste v závislosti na protékajícím proudu LED, který odpovídá řídicímu napětí. V případě LED Royal Blue roste o něco strměji než u LED Warm White. Nejdůležitější veličinou zobrazenou v křížových charakteristikách je měrný výkon (Efficiency), který můžeme považovat za poměrnou účinnost přeměny elektrické energie na světlo. U obou druhů měřených LED je hodnota měrného výkonu při řídicím napětí 1 V nad hodnotou 100 %. Je to tím, že LED při průchodu menšího proudu než je proud jmenovitý,

přeměňují elektrickou energii na světlo s vyšší účinností (jak již bylo popsáno v kapitole 4.3.1). LED Royal Blue dosahovaly nejvyšší relativní hodnoty měrného výkonu 170 % při hodnotě řídicího napětí 1 V. LED Warm White dosahovaly nejvyšší relativní hodnoty měrného výkonu 140 % při hodnotě řídicího napětí 1,25 V. Poté v závislosti na zvyšujícím se řídicím napětí (tzn., že roste proud procházející LED) relativní měrný výkon téměř lineárně klesá k hodnotě 100 % (které je dosaženo při maximální hodnotě řídicího napětí 10V).

5.3.3 Naměřené spektrum

Spektrální distribuce záření v rozsahu vlnových délek 380 až 780 nm byla měřena spektrometrem Konica Minolta CS-1000A [18]. Měření spektra bylo prováděno s rozlišením na 1 nm. V následujícím grafu jsou průběhy spektrální distribuce pro oba dva typy diod.



Obr. 5-4 Spektrální distribuce LED svítidla (měřeno po 1 nm) [18]

Na grafu spektrální distribuce světla je jasně vidět, že Bílé LED nám dodávají alespoň minimální intenzitu záření v celém rozsahu vlnových délek (λ) 400 až 700 nm (spektrální pásmo vhodné pro ozařování rostlin). U průběhu týkajícího se bílé LED můžeme také pozorovat jisté zvýšení intenzity záření v okolí vlnové délky 450 nm. Je to způsobeno tím, že použitá LED Warm White je realizována pomocí modré LED a luminoforu, který nám převádí modré záření na bílé. Oblast modré části spektra nám dále velmi výrazně posilují použité modré LED, díky tomu je intenzita ozáření vlnových délek od 440 do 470 nm velmi dobrá a bude jistě vyhovovat potřebám rostlin. Svítidlo sice neobsahuje červené LED, ale poměrně vysokou intenzitu záření v oranžové a červené části spektra nám zajišťují použité bílé LED (intenzita záření o vlnové délce 650 nm dosahuje přibližně 60 % intenzity záření o vlnové délce 450 nm). Z tohoto důvodu by podle mého názoru mohla být intenzita záření v oblasti oranžové až červené části spektra dostatečná, záleželo by to na konkrétním druhu rostlin, které bychom svítidlem ozařovali. Pokud by intenzita v tomto spektrálním pásmu nebyla přeci jen dostatečná, tak by bylo vhodné svítidlo doplnit o LED, které by posílily tuhle část spektra. Červená část spektra je důležitá především pro kvantitativní růst rostlin a vývin květů a plodů.

5.3.4 Příkon v závislosti na velikosti řídicího napětí

Závislost příkonu na velikosti řídicího napětí byla měřena za ustáleného stavu pomocí multimetru Agilent U1251A a měřiče spotřeby VoltCraft Energy Logger 4000F [18]. Řídicí signál 1 až 10 V byl vytvářen napájecím zdrojem Manson EP-613 [18]. Z naměřených hodnot seřazených v Tab. 5-1 a Tab 5-2 je dobře vidět, že závislost příkonu (P) na řídicím napětí (Uř) má lineární charakter. Je to dáno tím, že proud procházející LED roste v závislosti na zvyšujícím se řídicím napětí téměř lineárně.

Tab. 5-1 Závislost příkonu na řídicím napětí pro LED svítidlo – Warm White LED [18]

Uř (V)	P (W)	Uř (V)	P (W)	Uř (V)	P (W)
1,00	20,1	4,72	102,3	8,18	181,9
1,33	26,9	4,97	107,6	8,39	187,0
1,54	31,5	5,20	112,8	8,48	189,2
1,80	37,2	5,45	118,5	8,72	194,7
2,04	42,3	5,70	124,0	9,00	201,5
2,20	46,0	6,05	132,2	9,26	208,0
2,58	54,7	6,34	139,0	9,47	213,0
2,84	60,7	6,56	144,1	9,70	218,3
3,10	66,5	6,82	150,1	9,98	223,7
3,26	70,5	7,06	155,5	10,27	223,7
3,57	77,1	7,30	161,5		
3,82	82,5	7,50	165,8		
3,99	86,0	7,79	172,5		

Tab. 5-2 Závislost příkonu na řídicím napětí pro LED svítidlo – Royal Blue LED [18]

Uř (V)	P (W)	Uř (V)	P (W)	Uř (V)	P (W)
1,00	7,5	4,36	28,6	7,87 *	51,2
1,19	8,6	4,69	30,8	8,15	53,1
1,38	9,7	5,00	32,7	8,62	56,1
1,65	11,3	5,36	34,9	8,83	57,5
1,98	13,2	5,52	36,1	9,05	58,9
2,25	14,9	5,76	37,5	9,40	61,2
2,48	16,4	6,08	39,6	9,58	62,5
2,84	18,6	6,34	41,3	9,79	63,8
3,04	20,5	6,66	43,3	9,94	64,4
3,31	22,1	6,90	44,9	10,00	64,4
3,67	24,4	7,23	47,1	10,32	64,4
4,02	26,6	7,56	49,2		

* maximální hodnota řídicího napětí, při kterém nedochází k proudovému přetížení použité LED Royal Blue

5.3.5 Oteplení jednotlivých částí svítidla

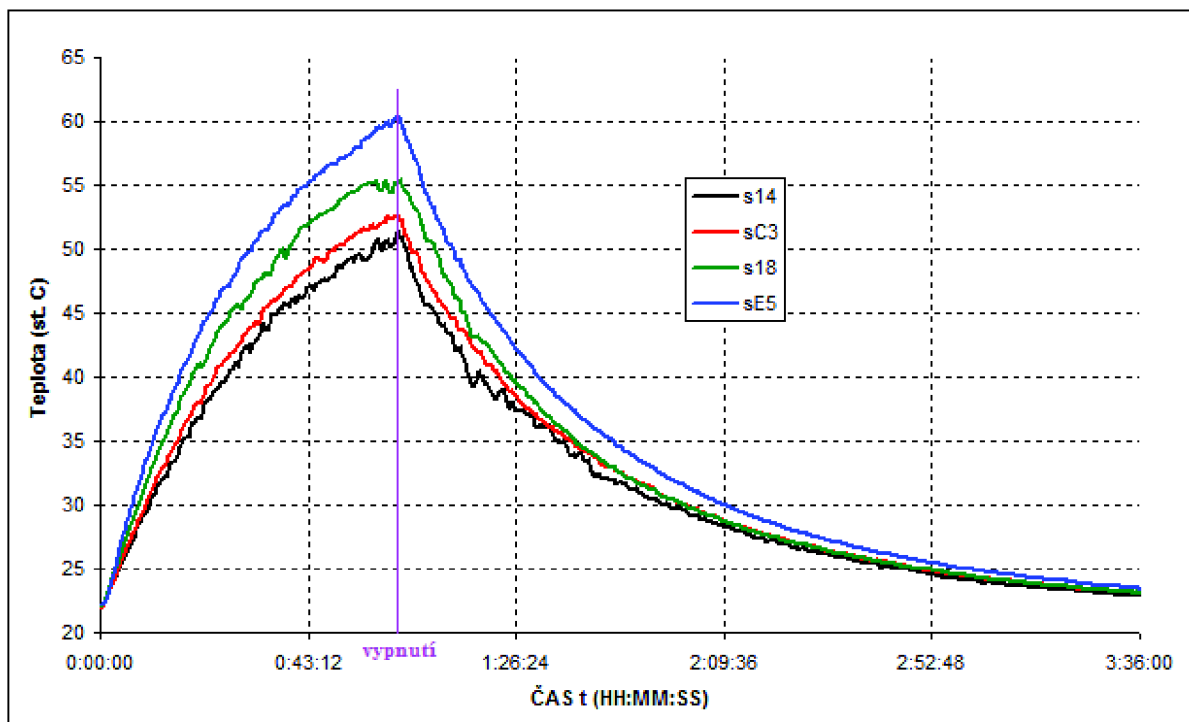
Měření oteplení jednotlivých částí svítidla bylo prováděno v místnosti s konstantní teplotou okolí 24°C. Svítidlo bylo umístěno do pracovní polohy a chlazení bylo pouze přirozenou (nenucenou) konvekcí a radiací do okolí.

Pro měření teplot bylo využito digitálních teplotních senzorů od firmy Texas Instrument s označením DS18B20 [18]. Senzory mají teplotní rozsah -40 až 125°C s maximální absolutní chybou 0,5°C. Měření bylo prováděno pomocí 4 senzorů po 15 s. Komunikace s PC byla

zajištěna přes rozhraní RS232 [18]. Měření oteplení jednotlivých částí svítidla můžeme rozdělit do 3 skupin:

- Měření oteplení bez chlazení
- Měření oteplení s vodním chlazením
- Měření oteplení s chladiči a aktivní ventilací

5.3.5.1 Měření oteplení svítidla bez chlazení

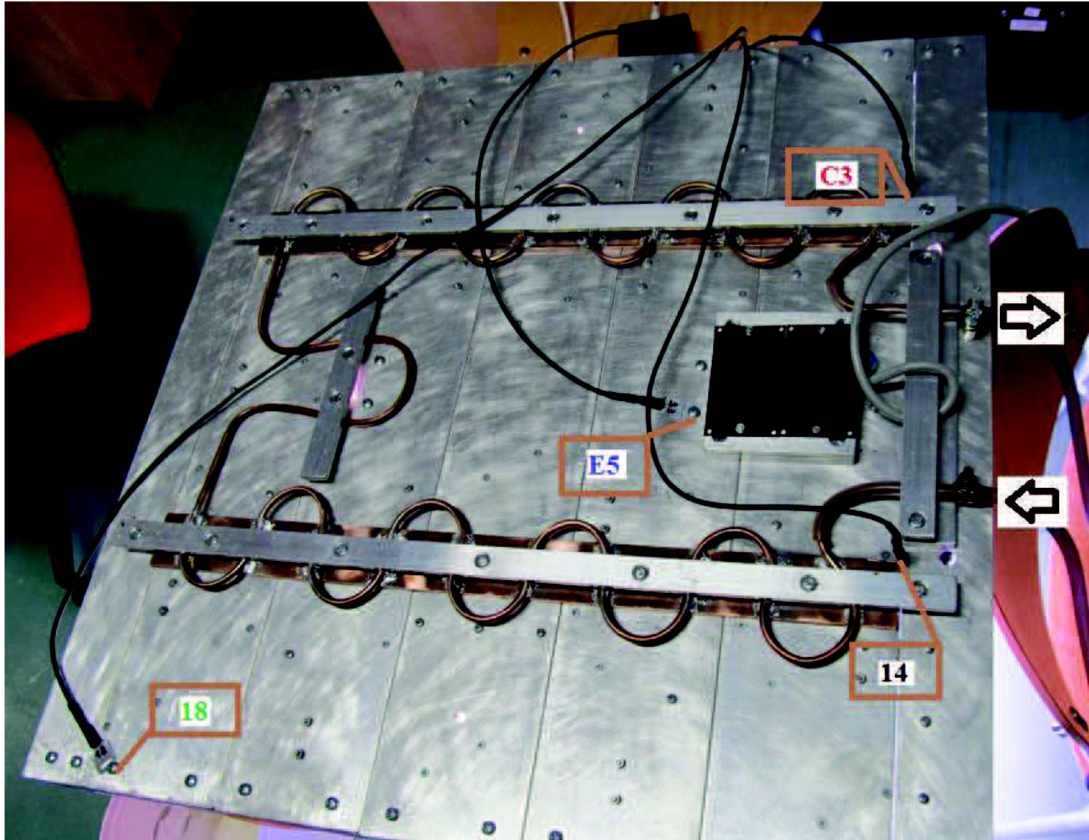


Obr. 5-5 Oteplení LED svítidla bez chlazení [18]

Oteplení jednotlivých komponentů svítidla bylo měřeno po dobu 1 hodiny [18]. Rozmístění jednotlivých senzorů na svítidle je znázorněno na Obr. 5-6. Jak můžeme vidět na grafické závislosti oteplení na čase, tak ani po 1 hodině chodu nedošlo k ustálení teploty svítidla. Nejvyšší naměřená teplota byla 60°C, a to pod napájecím zdrojem svítidla. Teplota má velký vliv na parametry LED. Negativně ovlivňuje hlavně měrný výkon a dobu života LED, proto je nutné zvolit vhodné konstrukční řešení a použití chlazení, aby nedocházelo k přehřívání svítidla a tím pádem nedocházelo ke zhoršování parametrů použitých světelných zdrojů. Déle než 1 hodinu nebylo svítidlo z důvodu možného přehřátí a poškození testováno. Výrobce LED použitých ve svítidle udává maximální teplotu PN přechodu 150°C [20] (při které nedojde k zničení LED).

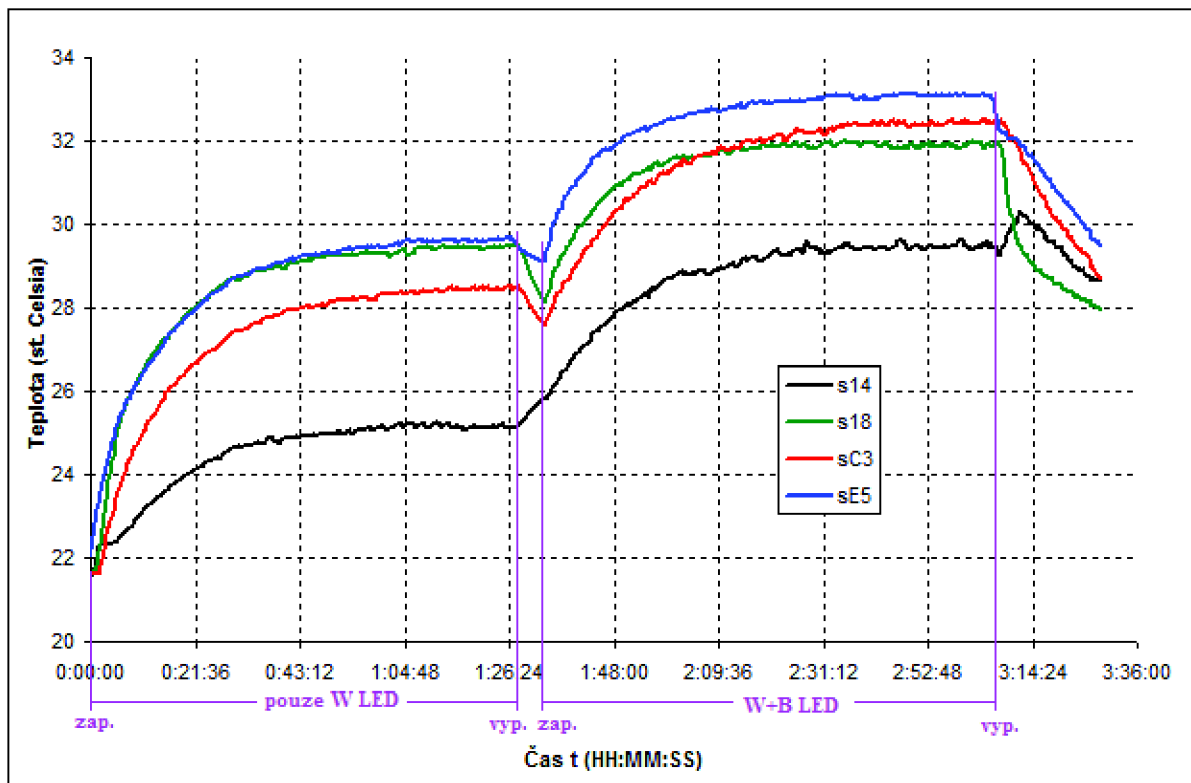
Senzory byly umístěny na 4 místech zadní strany svítidla:

- 14 Vstup chladicí kapaliny – teplota po 1 hodině chodu 51°C
- C3 Výstup chladicí kapaliny – teplota po 1 hodině chodu 52,5°C
- E5 Pod napájecím zdrojem – teplota po 1 hodině chodu 60°C
- 18 Okrajová část svítidla – teplota po 1 hodině chodu 55°C



Obr. 5-6 Rozmístění teplotních senzorů na LED svítidle [18]

5.3.5.2 Měření oteplení svítidla s vodním chlazením



Obr. 5-7 Oteplení LED svítidla s vodním chlazením [18]

Průběh oteplení svítidla s vodním chlazením je zobrazen na Obr. 5-7. Teplota chladicí vody v druhém okruhu se během měření pohybovala v rozsahu 19,5 až 20°C. Měření bylo prováděno nejprve pouze pro teplé bílé LED (Warm White LED) na maximální příkon. Rozmístění teplotních senzorů je pro toto měření shodné s obrázkem 5-6. Ustálené teploty na všech měřených místech bylo dosaženo přibližně za dobu jedné hodiny:

- 14 Vstup chladicí kapaliny – teplota po 1 hodině chodu 25,2°C
- C3 Výstup chladicí kapaliny – teplota po 1 hodině chodu 28,5°C
- E5 Pod napájecím zdrojem – teplota po 1 hodině chodu 29,5°C
- 18 Okrajová část svítidla – teplota po 1 hodině chodu 29,3°C

Poté bylo provedeno měření také pro modré LED (Royal Blue LED) společně s teplou bílou LED (Warm White LED), oboje na maximální příkon. K novému ustálení teplot na všech měřených místech došlo opět přibližně po jedné hodině chodu svítidla na plný výkon.

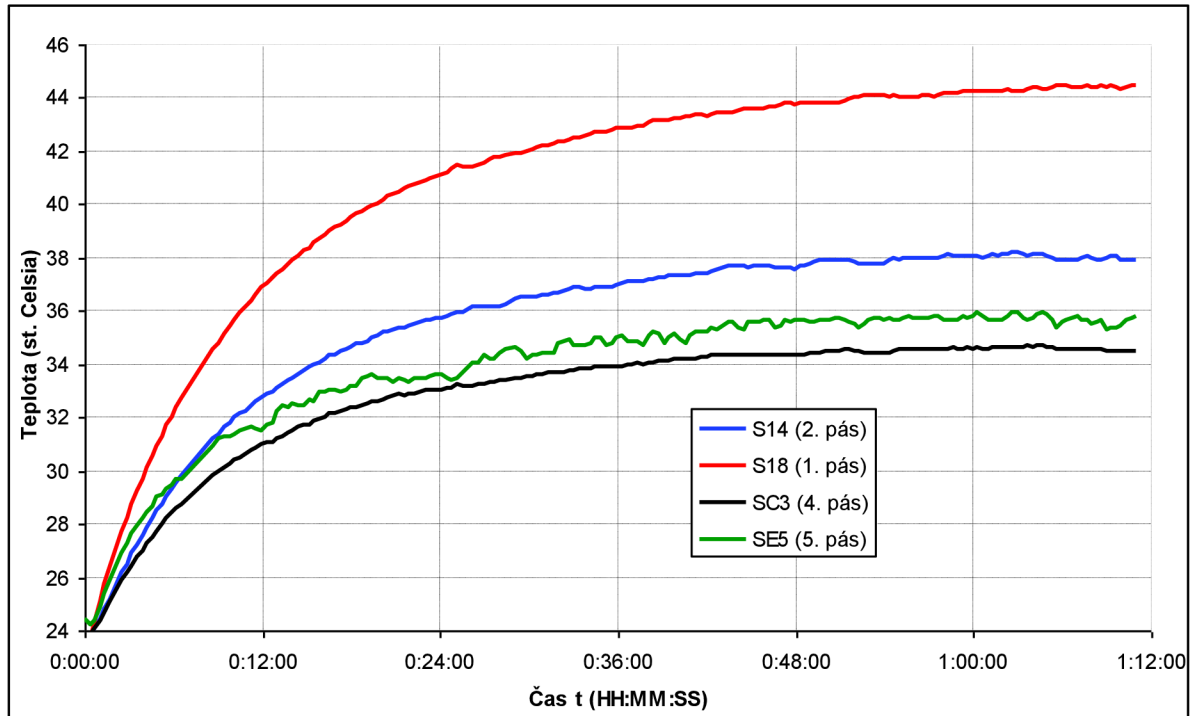
Hodnoty ustálených teplot, pro modré a bílé LED na plný výkon:

- 14 Vstup chladicí kapaliny – ustálená hodnota 29,5°C
- C3 Výstup chladicí kapaliny – ustálená hodnota 32,5°C
- E5 Pod napájecím zdrojem – ustálená hodnota 33,2°C
- 18 Okrajová část svítidla – ustálená hodnota 32,0°C

Z průběhů oteplení na Obr. 5-7 a z naměřených hodnot vyplývá, že použité vodní chlazení je pro chlazení svítidla vhodné. Neboť ustálené teploty nepřesáhly hodnotu 30°C, respektive 34°C v případě současného svitu modrých a bílých LED na maximální příkon.

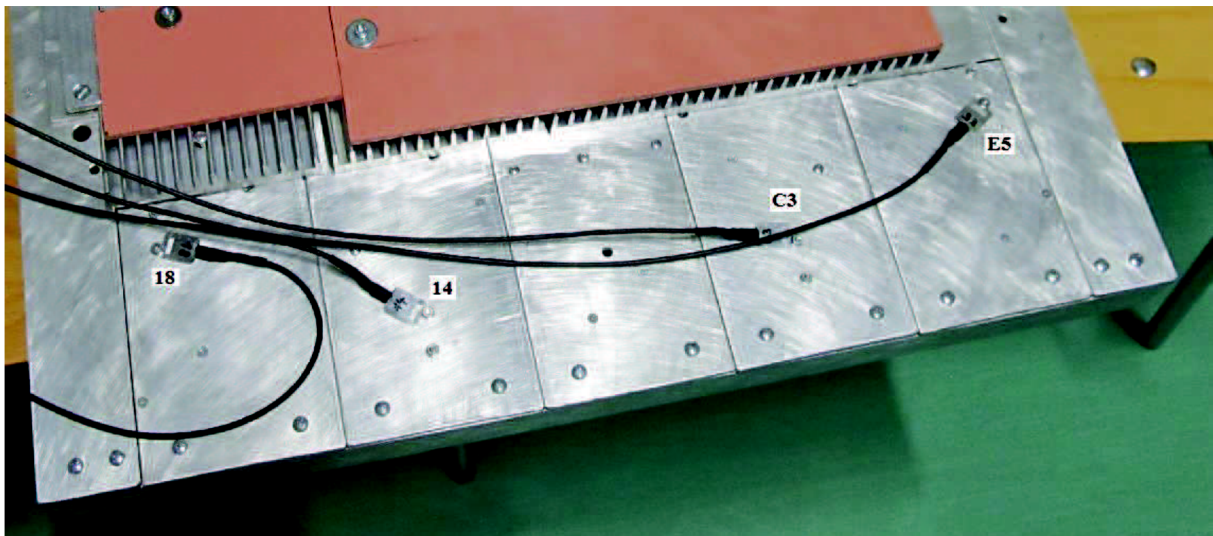
5.3.5.3 Měření oteplení svítidla s chladiči a aktivní ventilací

Dále bylo prototypové svítidlo testováno s chladiči s aktivní ventilací. Pro účely chlazení bylo použito hliníkových profilovaných chladičů o výšce 25 mm. Ventilace je zajištěna dvěma ventilátory 12 V 0,3 A, které jsou napájeny sníženou hodnotou napětí 9 V. Při tomto napětí dosahuje jejich příkon přibližně 3,5 W, takže se na spotřebě svítidla podílejí lehce nad 1 % [18]. Svítidlo se skládá z pěti pásů o šířce 100 mm, na kterých jsou umístěny jednotlivé komponenty. Měření bylo nejprve provedeno bez upraveného ventilačního kanálku pro přívod vzduchu do chladičů pro 1. pás (Obr. 5-8, Varianta A). Druhé měření je již provedeno s touto úpravou (Obr. 5-10, Varianta B).



Obr. 5-8 Oteplení LED svítidla s chladiči a aktivní ventilací (Varianta A) [18]

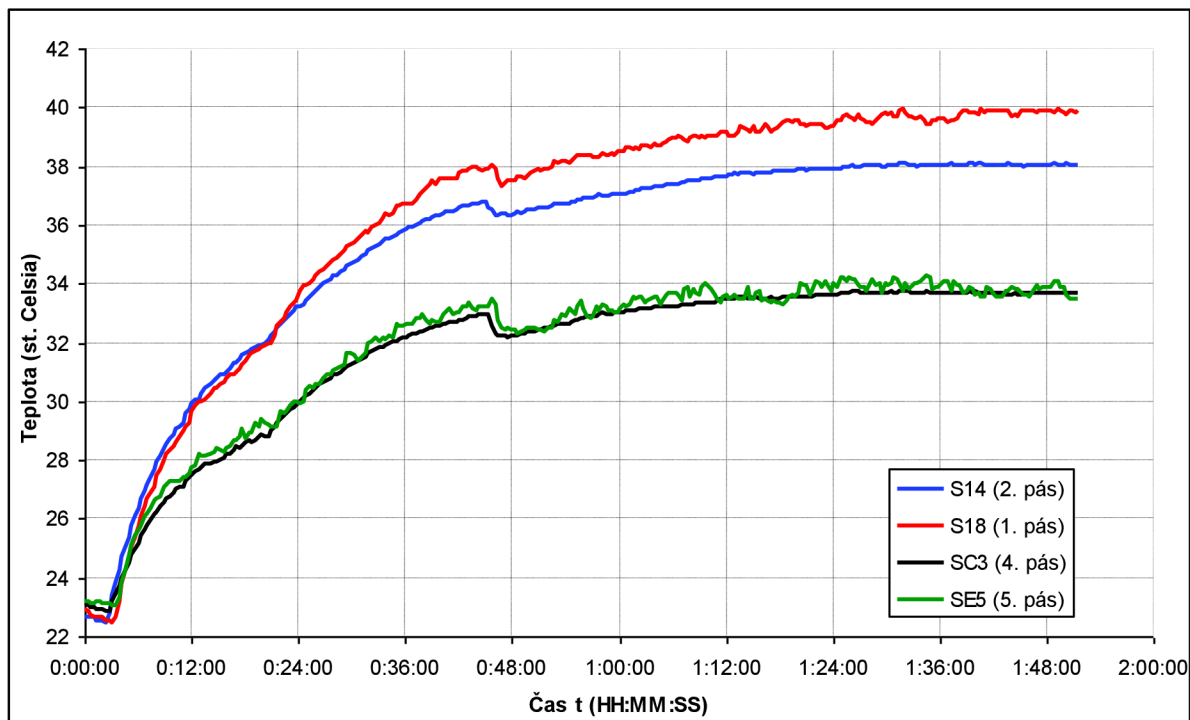
Měření bylo prováděno pro oba druhy LED na maximálním výkonu. Rozmístění teplotních senzorů je jiné, než při snímání teploty při použití vodního chlazení, a je uvedeno na obrázku 5-9.



Obr. 5-9 Rozmístění teplotních senzorů na LED svítidle [18]

Ustálené teploty na všech měřených místech bylo dosaženo přibližně za dobu jedné hodiny, a dosáhly těchto hodnot:

- 18 první pás – ustálená hodnota 44,5°C
- 14 druhý pás – ustálená hodnota 38°C
- C3 čtvrtý pás – ustálená hodnota 34,5°C
- E5 pátý pás – ustálená hodnota 36°C



Obr. 5-10 Oteplení LED svítidla s chladiči a aktivní ventilací (Varianta B) [18]

Po úpravě ventilačního kanálu pro přívod vzduchu do chladičů se teploty ustálily na všech měřených místech po přibližně jedné a půl hodině. Dále jsou uvedeny hodnoty ustálených teplot:

- 18 první pás – ustálená hodnota 40°C
- 14 druhý pás – ustálená hodnota 38°C
- C3 čtvrtý pás – ustálená hodnota 33,5°C
- E5 pátý pás - ustálená hodnota 34°C

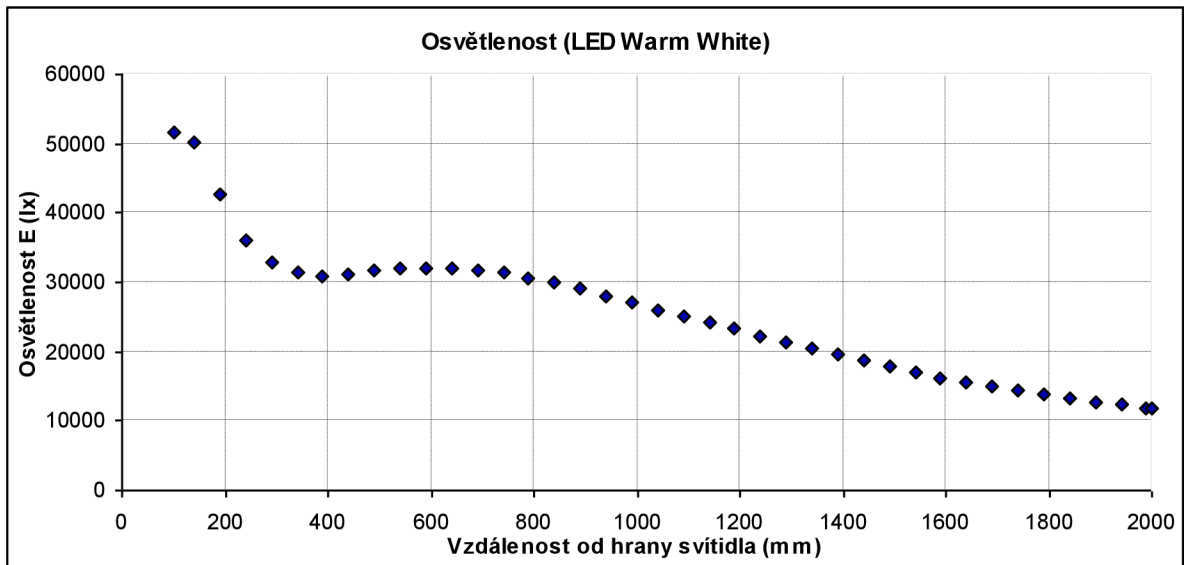
Při použití chladičů s aktivní ventilací nepřesáhla nejvyšší naměřená ustálená teplota hodnotu 45°C. Po úpravě ventilačního kanálku pro přívod vzduchu do chladičů pro 1. pás klesla nejvyšší naměřená ustálená teplota na 40°C. To je o nějakých 6°C více než při použití vodního chlazení, ale tento rozdíl bude mít na parametry LED zanedbatelný vliv. Dále pak je, podle mého názoru, použití aktivního chlazení s ventilátory technologicky méně náročné, než použití vodního chlazení. Příkon svítidla se tím zvýší jen nepatrně (lehce nad 1 %), to je podle mého názoru také velmi dobrý výsledek.

5.3.6 Osvětlenost a intenzita ozáření

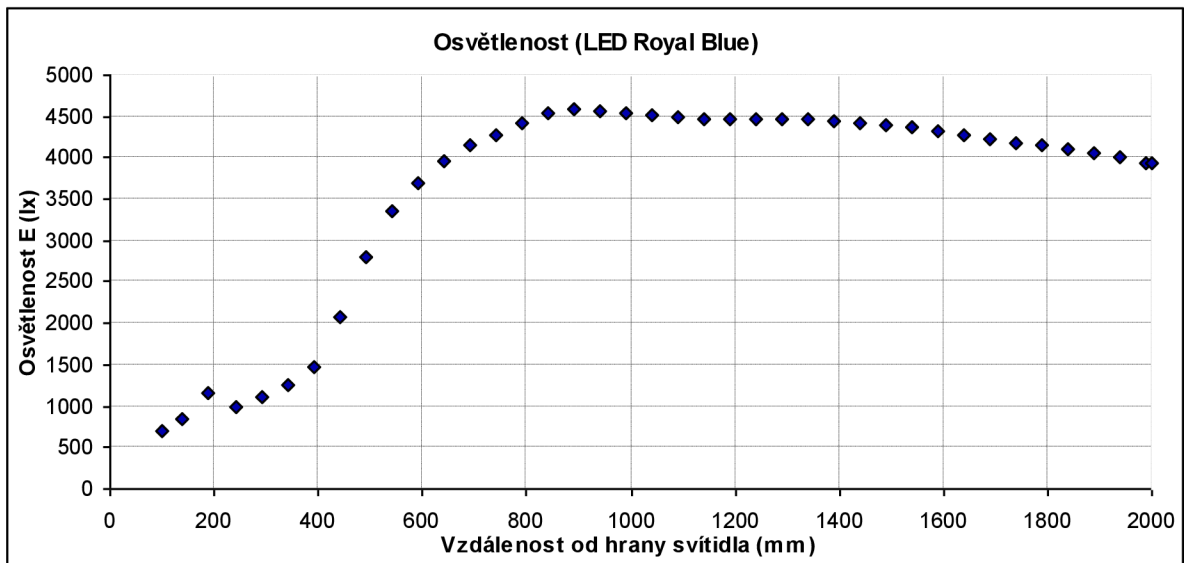
Hodnoty osvětlenosti byly měřeny v ose svítidla (jeho geometrickém středu) od jeho okraje. Měření bylo prováděno na fotometrické lavici o délce 3000 mm. Hodnoty osvětlenosti byly měřeny luxmetrem Lutron LX-105 a dále byly pomocí koeficientů přepočteny na jednotky $W_{\text{FAR}} \cdot \text{m}^{-2}$ a $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ [18]. Koeficienty byly získány výpočtem z naměřené spektrální distribuce světelného zdroje [18].

Měření je provedeno zvláště pro LED Royal Blue, LED Warm White, kombinaci obou diod a kombinaci Warm White + 60 % Royal Blue [18].

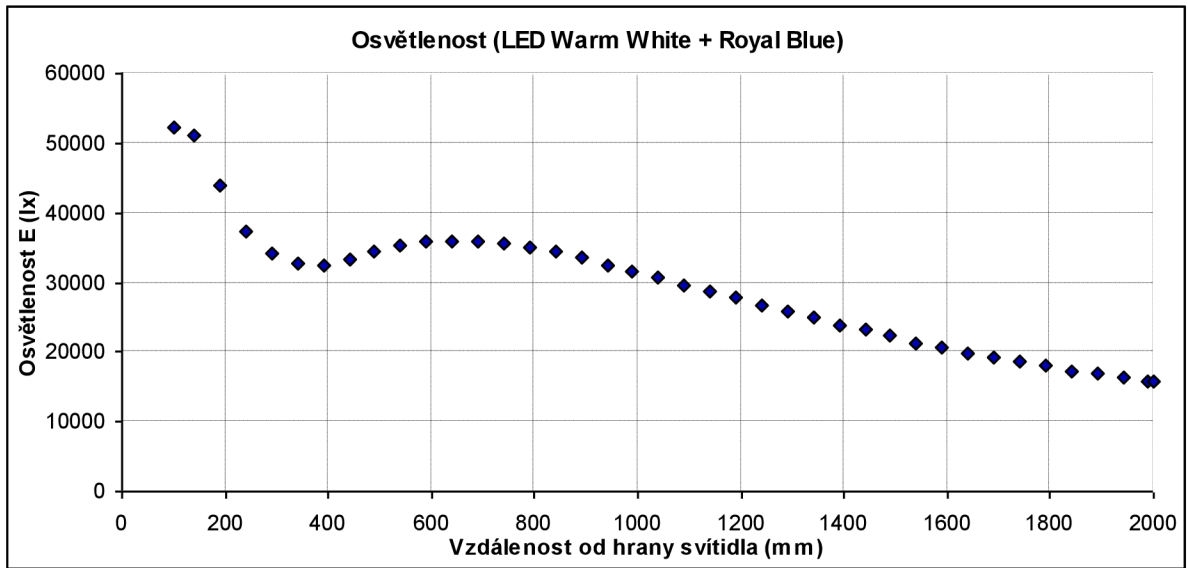
5.3.6.1 Osvětlenost



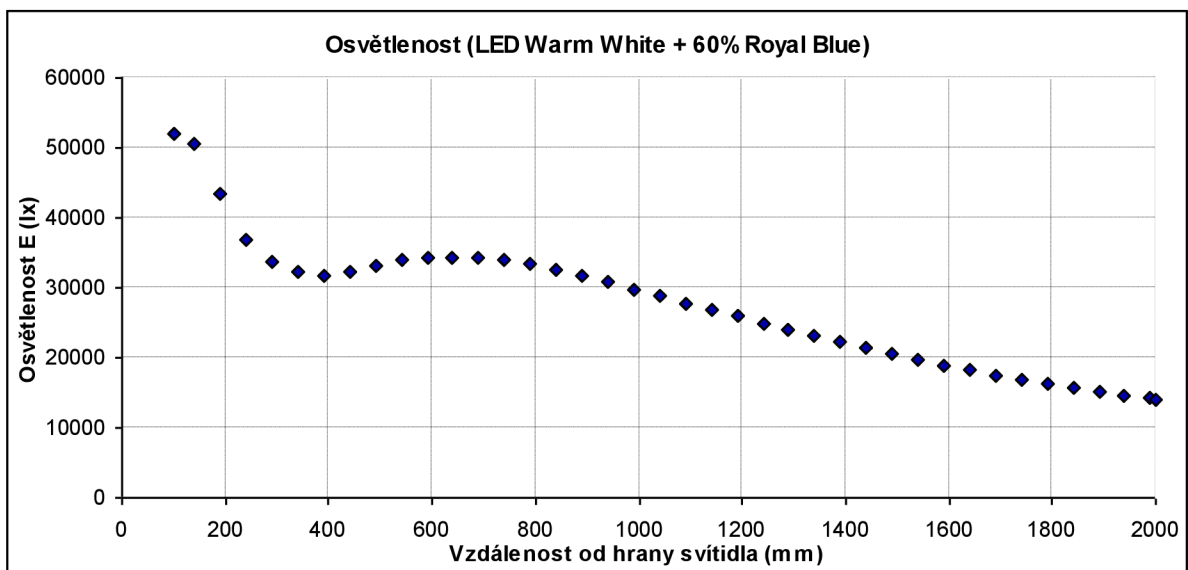
Obr. 5-11 Osvětlenost – svítidlo LED (Warm White LED) [18]



Obr. 5-12 Osvětlenost – svítidlo LED (Royal Blue LED) [18]

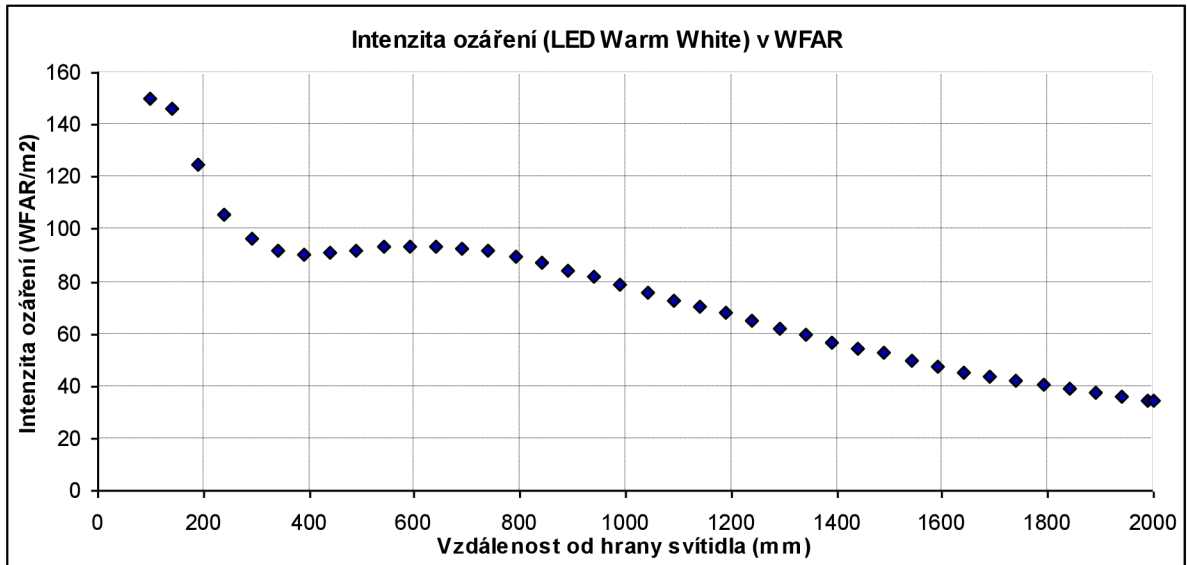


Obr. 5-13 Osvětlenost – svítidlo LED (Warm White + Royal Blue LED) [18]

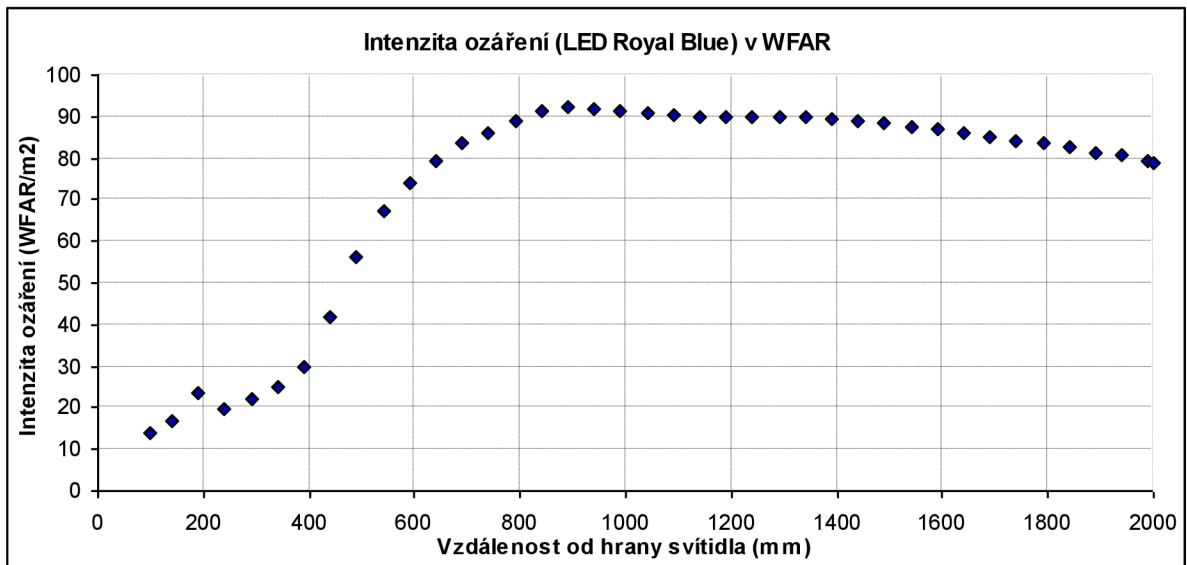


Obr. 5-14 Osvětlenost – svítidlo LED (Warm White + 60 % Royal Blue LED) [18]

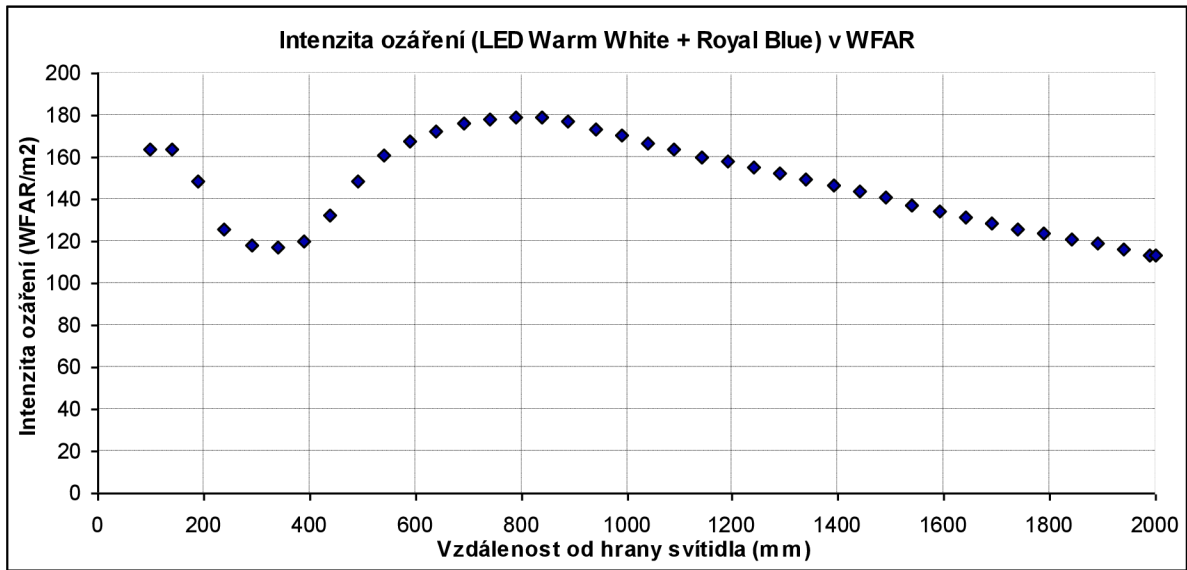
5.3.6.2 Intenzita ozáření v WFAR



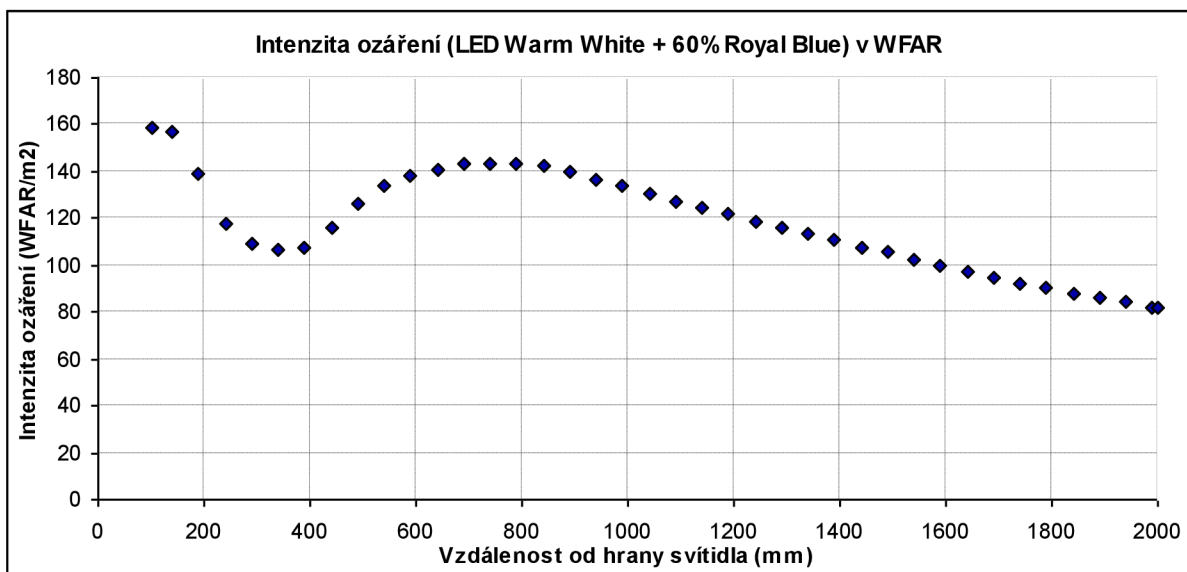
Obr. 5-15 Hodnota intenzity ozáření v WFAR – svítilno LED (Warm White) [18]



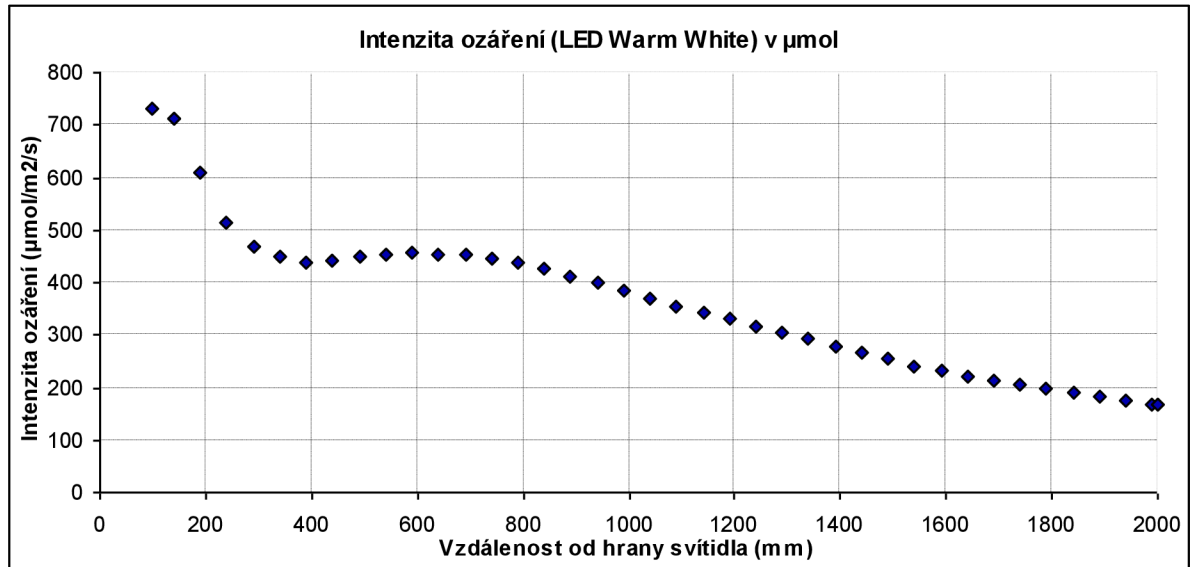
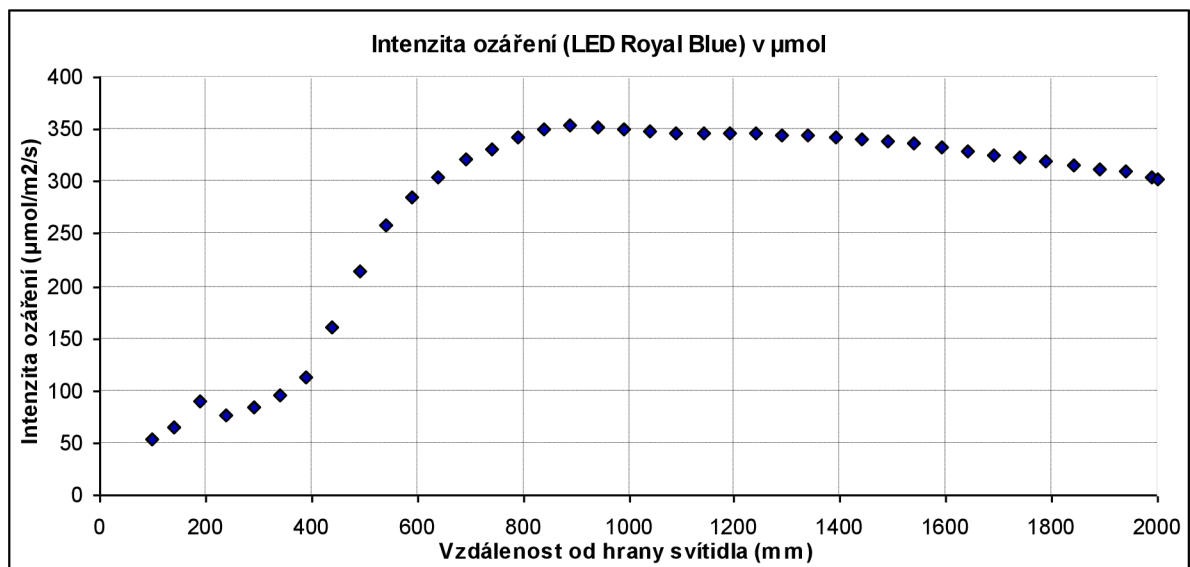
Obr. 5-16 Hodnota intenzity ozáření v WFAR – svítilno LED (Royal Blue) [18]

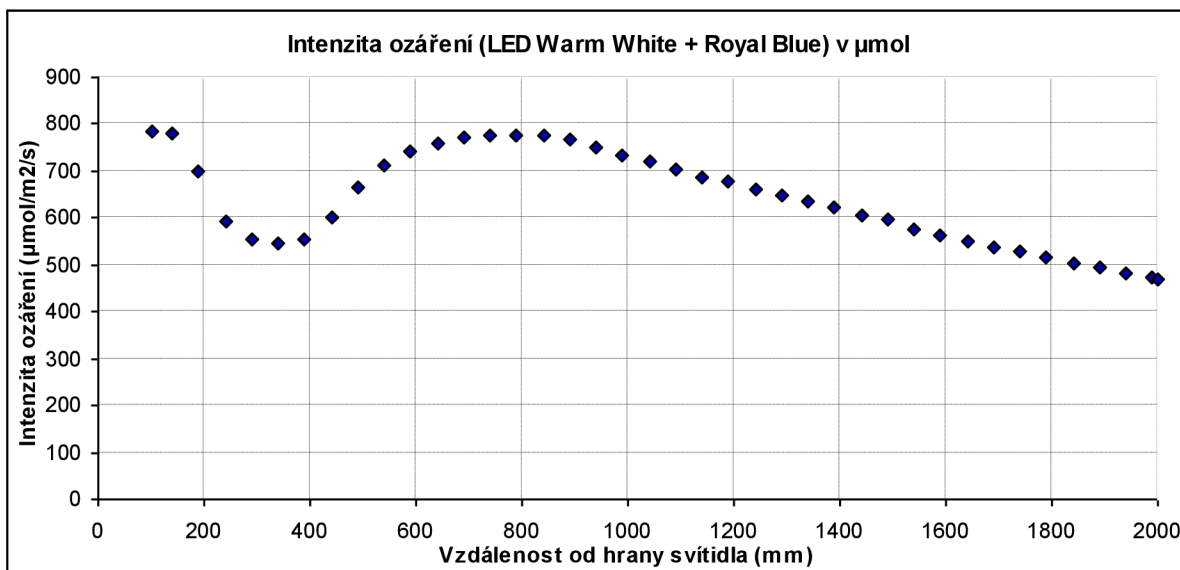


Obr. 5-17 Hodnota intenzity ozáření v WFAR – svítidlo LED (Warm White + Royal Blue) [18]

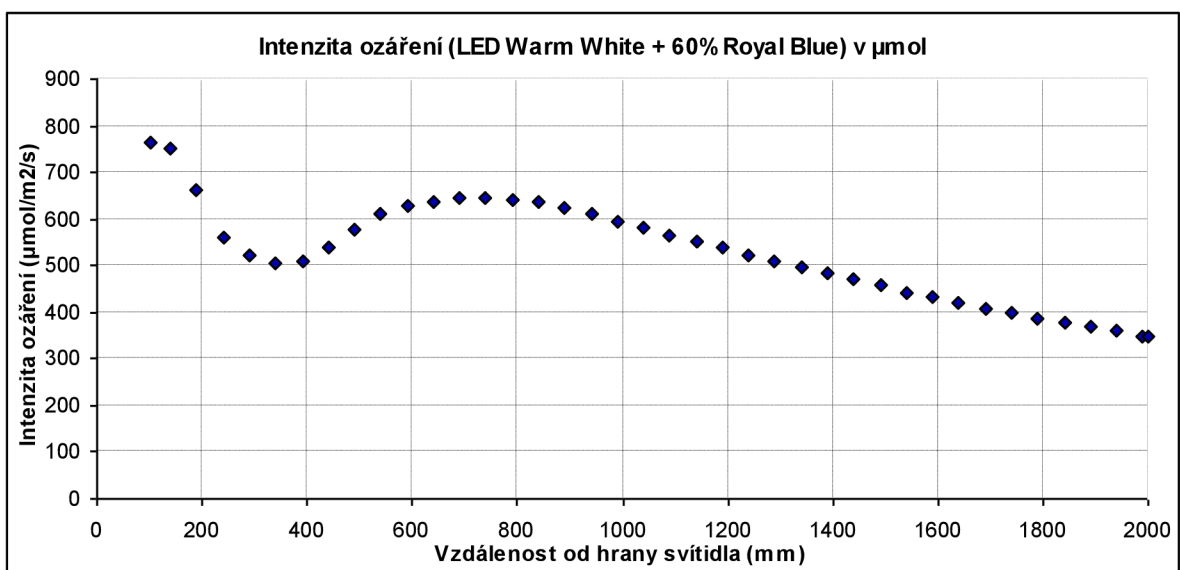


Obr. 4-18 Hodnota intenzity ozáření v WFAR – svítidlo LED (Warm White + 60 % Royal Blue) [18]

5.3.6.3 Intenzita ozáření v μmol Obr. 5-19 Hodnota intenzity ozáření v μmol – svítilno LED (Warm White) [18]Obr. 5-20 Hodnota intenzity ozáření v μmol – svítilno LED (Royal Blue) [18]



Obr. 5-21 Hodnota intenzity ozáření v μmol – svítilno LED (Warm White + Royal Blue) [18]



Obr. 5-22 Hodnota intenzity ozáření v μmol – svítilno LED (Warm White + 60 % Royal Blue) [18]

Na naměřených průbězích závislosti osvětlenosti a intenzity ozáření na vzdálenosti od hrany svítidla můžeme vidět, že při malých vzdálenostech svítidla a detektoru (luxmetru) mají závislosti zvláštní průběh. Je to způsobeno tím, že čtvercový fotometrický zákon platí pouze pro bodové zdroje. Za bodový zdroj světla lze považovat takový zdroj, který má dostatečně malé rozměry vzhledem ke vzdálenosti, ve které je umístěn detektor. Proto při malých vzdálenostech svítidla a detektoru neplatí fotometrický zákon (čtvercový) a naměřené hodnoty jsou zatíženy jistou chybou. Z tohoto důvodu bych uvažoval jako relevantní hodnoty osvětlení (intenzity ozáření), které byly naměřeny ve větší vzdálenosti od svítidla. Svítilno jako takové je zamýšleno k osvětlování rostlin ze vzdálenosti 1500 až 2000 mm, proto bych se zaměřil na hodnoty naměřené na tomto intervalu vzdálenosti svítidla od detektoru. Dále můžeme při malých

vzdálenostech svítidla a detektoru pozorovat jistý rozdíl průběhů pro LED Warm White a LED Royal Blue, je to způsobeno použitou optikou, která je u obou druhů LED odlišná, jak již bylo popsáno v kapitole 5.5.1. Za povšimnutí jistě stojí to, že při vyjádření osvětlenosti v luxech nám vychází mnohem větší osvětlenost při měření s LED Warm White než s LED Royal Blue (při vzdálenosti detektoru 2000 mm od svítidla vychází osvětlenost v případě LED Warm White přibližně 12000 lx a v případě LED Royal Blue mírně pod 4000 lx). Naproti tomu po přepočítání naměřených hodnot osvětlenosti pomocí koeficientů na jednotky $W_{\text{FAR}} \cdot \text{m}^{-2}$ a $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, nám vychází intenzita ozáření vyjádřená jak v $W_{\text{FAR}} \cdot \text{m}^{-2}$ tak v $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ větší pro LED Royal Blue než pro LED Warm White. Je to způsobeno tím, že koeficienty zohledňují spektrální citlivost rostlin a rostliny mají větší citlivost právě na modrou část spektra. Intenzita ozáření je ve vzdálenosti 2000 mm od svítidla v případě současného svitu LED Warm White a LED Royal Blue přibližně $470 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ a pro nastavení svitu LED Warm White na plný výkon a LED Royal Blue na 60 % výkonu vychází intenzita ozáření $350 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. To znamená, že podmínka, aby svítidlo ve vzdálenosti 1500 až 2000 mm zabezpečilo na plný výkon minimální intenzitu ozáření $300 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, je splněna jak při svitu LED Warm White a LED Royal na plný výkon, tak při současném svitu LED Warm White na plný výkon a LED Royal Blue na 60 % výkon.

5.4 Zhodnocení výsledků měření

Měřením byly ověřeny teoretické předpoklady vhodnosti prototypového svítidla pro ozařování rostlin a zjištěny skutečné světelné a elektrické parametry svítidla. Jedná se tedy o svítidlo přímé s hlubokým až koncentrovaným tvarem křivek svítivosti, který je dán použitou optikou u LED zdrojů. LED Warm White dodávají alespoň minimální intenzitu záření v celém rozsahu FAR, oblast modré části spektra je navíc vhodně posílena LED Royal Blue. Intenzita záření v modré části spektra bude tedy jistě dostatečná. Menší intenzitu záření svítidlo vyzařuje v červené části spektra, která je důležitá pro kvantitativní růst rostlin a vývin květů a plodů. Možná by bylo vodné posílit vhodnými LED také červenou část spektra. Co se týče potřebné celkové intenzity ozáření, tak svítidlo splňuje vytyčenou podmínku, aby ve vzdálenosti 1500 až 2000 mm byla zabezpečena na plný výkon minimální intenzita ozáření $300 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. Chlazení svítidla je, jak při použití vodního chlazení, tak při použitím chladičů s aktivní ventilací, dostatečné. Teplota jednotlivých částí svítidla nepřesáhla při měření hodnotu 45°C , nedochází tedy k výraznému oteplení svítidla, čímž by mohlo dojít ke zhoršení parametrů světelných zdrojů. Příkon svítidla dosahuje při maximální hodnotě řídicího napětí a současném svitu všech LED přibližně 288 W. Bohužel nemůžeme stanovit měrný výkon v absolutních hodnotách, protože ani světelný tok není změřen v absolutních hodnotách (musel by se měřit v kulovém integrátoru s využitím korekce). Hodnoty měrného výkonu v relativních hodnotách jsou zobrazeny v křížových charakteristikách, kde můžeme u obou typů měřených LED pozorovat, že LED přeměňují elektrickou energii na světlo s vyšší účinností při průchodu menšího proudu, než je proud jmenovitý. (Tím je ověřen tento fakt zmiňovaný v teoretické části v kapitole 4.3.1).

Svítilno je tedy dle mého názoru vhodné pro ozařování rostlin, neboť bylo měřením ověřeno, že splňuje charakteristické požadavky rostlin na osvětlení. Dále by bylo vhodné svítidlo vyzkoušet v praxi, například v pěstební komoře, kde by bylo možné porovnat svítidlo s běžně používanými svítidly na ozařování rostlin a posoudit tak jeho kvalitu.

6 ZÁVĚR

Začátek práce je věnován fyziologii rostlin a jejich potřebám pro úspěšný vývoj a růst. Je zde stručně vysvětlen proces dýchání rostlin, dále pak popsán proces fotosyntézy a hlavně jsou zde popsány vnější faktory ovlivňující rychlost fotosyntézy. K těmto faktorům patří zejména spektrum a intenzita záření, které jsou nezbytné pro optimalizaci dalších faktorů. Dalšími faktory jsou koncentrace CO_2 v ovzduší, teplota a vlhkost vzduchu, obsah vody v půdě, dostatek živin a teplota půdy. Pokud chceme dosáhnout co nejvyšší rychlosti fotosyntézy a tím pádem i růstu, musí být všechny tyto uvedené faktory optimalizovány.

Druhá část práce se na úvod zabývá popisem fotometrických veličin, kterými hodnotíme světlo z pohledu člověka, a popisem tzv. FAR veličin, kterými hodnotíme záření s ohledem na spektrální citlivost rostlin. Dále je zde věnován prostor rozdílu požadavků na osvětlení, neboť z hlediska osvětlení mají rostliny zcela odlišné požadavky než lidské oko. Jedná se hlavně o rozdílnou spektrální citlivost. Lidské oko je nejcitlivější na vlnové délky přibližně uprostřed spektra viditelného záření (s maximem přibližně v 555 nm). Naproti tomu rostliny, které vnímají nejintenzivněji fotosynteticky aktivní záření (záření o vlnových délkách 400 až 700 nm), mají jistý propad citlivosti na vlnové délky uprostřed spektra viditelného záření. Nejvyšší spektrální citlivost mají rostliny na okrajích spektra viditelného záření, a to v oblasti modrého světla (s maximem přibližně v 450 nm) a v oblasti červeného světla (s maximem kolem 650 nm). Ovšem je nutné poznamenat, že spektrální citlivost záleží na konkrétním druhu rostliny, a může se měnit i v rámci denního cyklu. Také podle nejnovějších výzkumných prací, které se snaží stanovit celkovou spektrální citlivost rostlin k optickému záření, má celá část viditelného záření, včetně žlutozelené části, podstatný vliv na vývoj a růst rostlin. Proto je podle mého názoru vhodné, aby bylo při umělém ozařování zastoupeno, alespoň v minimální míře, celé spektrum viditelného záření. Rostliny také potřebují dostatečnou intenzitu záření, která je taktéž závislá na druhu rostliny a její fázi vývoje. Podle potřebné intenzity ozáření můžeme rostliny dělit na rostliny s vysokými požadavky (ozáření více než $150 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$), se středními požadavky (40 až $50 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$) a s nízkými požadavky (ozáření méně než $40 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$).

Světelné zdroje LED umožňují potřebám rostlin, které jsou popsány v první a druhé části práce, vyhovět pravděpodobně zcela nejlépe ze všech v současné době dostupných světelných zdrojů. Pro dosažení spektra, které bude optimální pro fotosyntézu a další biologické procesy rostlin, je podle mého názoru vhodné použít bílé LED, které nám zajistí alespoň minimální intenzitu v celém rozsahu spektra FAR, v kombinaci s červenými a modrými LED. Výkonových Bílých LED je v dnešní době na trhu velké množství, vyrábějí se s teplotou chromatičnosti od 2600 K až po 10 000K, pro použití k ozařování rostlin jsou nejvhodnější LED vyzařující teplé bílé světlo (T_n od 2600 K do 3700 K). Červené a modré LED by sloužily pro posílení vlnových délek záření, na které mají rostliny vysokou spektrální citlivost (nejlépe modré LED emitující záření o vlnové délce 450nm a červené LED 650 nm). Následnou regulací jednotlivých světelných zdrojů, pak můžeme upravovat spektrum emitovaného záření dle potřeby. LED mají jednu z nejvyšších účinností přeměny elektrické energie na světlo, která se pohybuje mezi $90 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ a $120 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$, dále mají dlouhou střední dobu života, kterou výrobci uvádějí až 50 000 hodin. Světelný výkon dosahuje, u výkonových LED s příkonem 10W napájených jmenovitým proudem 3 A, až 1000 lm. Maximální teplota PN přechodu, při které nedojde ke zničení LED, dosahuje běžně 150°C .

Ve čtvrté části práce jsou shrnuty základní požadavky, které by mělo svítidlo se světelnými zdroji LED splňovat, aby byly splněny charakteristické požadavky rostlin na osvětlení, definované v první a druhé části práce, s ohledem na možnosti a parametry LED, popsané v třetí části práce. Kultivační svítidlo, které bude určené pro použití v pěstební komoře, je nutné rozdělit na větší počet bodů, do kterých budou umístěny, již zmiňované, vhodné LED (bílé, modré, případně červené). Je to nutné z důvodu co největší rovnoměrnosti ozáření a dosažení potřebné intenzity záření. Rozložení světelného toku světelných zdrojů můžeme upravit vhodnou optikou. Potřebná intenzita záření záleží na druhu rostliny a celé řadě faktorů. Aby byla zaručena dostatečná intenzita záření s ohledem na uvedené požadavky rostlin, tak je podle zjištěných poznatků vhodné, aby intenzita ozáření uprostřed osvětlovací roviny svítidla, při svitu svítidla na plný výkon, dosahovala alespoň $300 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ (což v energetickém měřítku odpovídá přibližně $80 \text{ W}_{\text{FAR}}\cdot\text{m}^{-2}$). Tato hodnota bude dostatečná pro většinu rostlin, v případě potřeby nižší intenzity záření můžeme tuto hodnotu snížit pomocí regulace výkonu světelných zdrojů. Svítidlo musí zajišťovat dostatečný odvod tepla, aby nedocházelo k jeho přehřívání a s tím spojeným zhoršováním parametrů použitých světelných zdrojů. Svítidlo by mělo dále sloužit k ochraně světelných zdrojů před okolním prostředím, k připojení ke zdroji elektrické energie, mělo by umožňovat jednoduchou montáž a údržbu a musí vyhovovat z hlediska ochrany před nebezpečným dotykovým napětím a před vniknutím cizích předmětů a vody.

Závěrečná část práce je věnována prezentaci a zhodnocení výsledků měření, na již zkonstruovaném svítidle se světelnými zdroji LED, které je určené k ozařování rostlin. Rozměr světelně aktivní části svítidla, na kterém bylo prováděno měření, je 590 x 590 mm. Jako světelné zdroje pro toto svítidlo byly vybrány dva typy LED výrobce CREE z řady XM-L a XP-E. Jejich napájení obstarávají regulovatelné spínané proudové zdroje výrobce Mean Well z řady LPF a HGL. Svítidlo je navrženo pro osvětlování rostlin ze vzdálenosti 1500 až 2000 mm, kde na plný výkon zabezpečuje minimální intenzitu ozáření $300 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Jako hlavní světelný zdroj svítidla bylo použito 26 LED Warm White (teplá bílá) v typovém provedení XM-L. Pro posílení záření v modré části spektra bylo použito 14 LED Royal Blue v typovém provedení XP-E. Měřeními byly ověřeny teoretické předpoklady vhodnosti prototypového svítidla pro ozařování rostlin a zjištěny skutečné světelné a elektrické parametry svítidla. Křivky svítivosti svítidla jsou hluboké až koncentrované a jsou dány použitou optikou světelných zdrojů LED. LED Warm White dodávají alespoň minimální intenzitu záření v celém rozsahu FAR, oblast modré části spektra je navíc vhodně posílena LED Royal Blue. Možná by bylo vhodné posílit vhodnými LED také červenou část spektra, která je důležitá pro kvantitativní růst rostlin a vývin květů a plodů. Chlazení svítidla je, jak při použití vodního chlazení, tak při použitím chladičů s aktivní ventilací, dostatečné. Teplota jednotlivých částí svítidla nepřesáhla při měření hodnotu 45°C , nedochází tedy k výraznému oteplení svítidla, čímž by mohlo dojít ke zhoršení parametrů světelných zdrojů. Příkon svítidla dosahuje při maximální hodnotě řídicího napětí a současném svitu všech LED přibližně 288 W. Celkový měrný výkon svítidla nemůžeme stanovit v absolutních hodnotách, protože ani světelný tok nebyl změřen v absolutních hodnotách. Hodnoty měrného výkonu v relativních hodnotách jsou zobrazeny v křížových charakteristikách, kde můžeme u obou typů měřených LED pozorovat, že LED přeměňují elektrickou energii na světlo s vyšší účinností při napájení menším proudem, než je proud jmenovitý.

Svítidlo je tedy dle mého názoru vhodné pro ozařování rostlin, neboť bylo měřeními ověřeno, že splňuje charakteristické požadavky rostlin na osvětlení. Jako další postup bych navrhl odzkoušet svítidlo v praxi, například v pěstební komoře. Svítidlo by bylo vhodné porovnat s běžně používanými svítidly na ozařování rostlin, aby se dala posoudit jeho kvalita.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MATOUŠ, M. – HUTLA, P.: *Světlo a rostlina*. Světlo, 2002, č. 4.
- [2] JAROSLAV DOLEČEK. *Moderní učebnice elektroniky - 3.díl: Optoelektronika a optoelektronické prvky*. 1. české. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-184-5.
- [3] KUČEROVÁ, Jana a Zdeňka VLAHOVÁ. Fyziologie rostlin. In: *Maturitní otázky, referáty* [online]. 1998 [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: http://www.imaturita.cz/b_1/11biol.pdf
- [4] 3pól. *Vliv oxidu uhličitého na růst rostlin* [online]. 2010, 5.5.2010 [cit. 2012-12-12]. Dostupné z: <http://3pol.cz/864-vliv-oxidu-uhliciteho-v%C2%A0ovzduši-na-rust-rostlin>
- [5] MÁHRLOVÁ, Zuzana. *Vliv teploty na procesy fotosyntézy a růst C3 a C4 rostlin ve výuce biologie na školách*. Praha, 2010. Bakalářská práce. Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze Katedra experimentální biologie rostlin. Vedoucí práce Doc. RNDr. Jana Albrechtová, Ph.D.
- [6] Vzduch. *Zahradní trvalky* [online]. 20.8.2011 [cit. 2012-12-12]. Dostupné z: <http://zahradni-trvalky.cz/tag/vlhkost-vzduchu/>
- [7] DUŠKOVÁ, Simona. *Studium adaptacních zmen ve fotosyntéze a transpiraci rostlin *Hordeum vulgare* L. pri vodním stresu*. Praha, 2009. Disertační práce. ČESKÁ ZEMĚDELSKÁ UNIVERZITA V PRAZE Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů Katedra botaniky a fyziologie rostlin. Vedoucí práce doc. Ing. Václav Hejnák, Ph.D.
- [8] ULBRICHOVÁ, Iva. *Sluneční záření* [online]. [cit. 2012-12-12]. Dostupné z: http://fle.czu.cz/~ulbrichova/Skripta_EKOL/lesazareni/slunecnizareni.htm
- [9] BAXANT, Petr a Jiří DRÁPELA. *Užití elektrické energie* [online]. 18.11.2007. Brno, 2007 [cit. 2012-12-12]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=19288
- [10] Fotometrické veličiny. REICHL, Jaroslav a VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006. vyd. 2006 [cit. 2012-12-12]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/535-fotometricke-veliciny>
- [11] ČERNÁ, Ladislava. *Fotometrie, radiometrie a spektroskopie: Měření neelektrických veličin* [online]. Praha [cit. 2012-12-12]. Dostupné z: <http://pasan.feld.cvut.cz/dokumenty/fotometrie.pdf>
- [12] HLADKÝ, Lluďek: *Osvětlení z pohledu rostlin*. Světlo, 2010, č. 4.
- [13] DVOŘÁČEK, Vladimír: *Světelné zdroje – světelné diody*. Světlo, 2009, č. 5.
- [14] HAŠ, S. – FIKAROVÁ, F.: *Navrhování osvětlení pro interiérové květiny*. Světlo, 2011, č. 3.
- [15] HABEL, Jiří: *Základy světelné techniky(5)*. Světlo, 2009, č. 6.
- [16] Drápela, J., Baxant., P. Užití elektrické energie. Laboratorní cvičení. FEKT VUT v Brně: 2009, Skriptum, 53 stran. (cs)
- [17] KRBAL, Michal, Petr BAXANT a Jan ŠKODA. Svítidla a světelné zdroje pro pěstování rostlin. *Electric power engineering 2012*. 2012.
- [18] KRBAL, Michal a Petr BAXANT. *Svítidla pro fytotrony: Svítidlo LED*. Brno, 2014, 47 s.

- [19] Optiky pro LED diody: Sekundární optické členy pro power LED CREE. KATALOG. *Komponenty pro LED osvětlovací techniku - TRON* [online]. 2014 [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://www.tron.cz/Produkty/LED-diody-moduly-a-DPS/Optiky-pro-LED-diody>
- [20] CREE. *Cree® XLamp® XM-L LEDs: Product family data sheet* [online]. 2013 [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: <http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/Data%20and%20Binning/XLampXML.pdf>
- [21] Komponenty pro LED osvětlovací techniku. *TRON elektronické součástky* [online]. 2014 [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: http://www.ledlamp.com/led_prislusenstvi/opticke_cleny.html
- [22] WRIGHT, Maury. LEDs Magazine and Illumination in Focus. In: *LEDs Magazine - LED Technology, Solid State Lighting and LED Lighting Applications* [online]. 2014, 1.4.2014 [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://www.ledsmagazine.com/content/leds/en/articles/2014/04/cree-launches-800-lm-led-module-at-l-b-sets-lab-efficacy-mark.html>
- [23] HEJNÁK, Václav. Rostliny na podzim. In: *Univerzita třetího věku při Provozně ekonomické fakultě ČZU v Praze* [online]. 2005 [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: http://etext.czu.cz/php/skripta/kapitola.php?titul_key=64&idkapitola=15
- [24] KARNET, P. *Dendrologický průzkum růstových charakteristik*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, 2008. 90 s. Disertační práce
- [25] LED Technologie - FAQ. *Power Tech: Napájecí systémy UPS a Kovovýroba* [online]. Praha [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: <http://www.power-tech.cz/led-lighting-faq.php>
- [26] HAŠ, Stanislav a Petra PAVLÍČKOVÁ. Osvětlování okrasných rostlin v interiérech. *Světlo* [online]. 2010, č. 4 [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=41828