



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

CHYTRÉ SOLÁRNÍ SVÍTIDLO

SMART SOLAR LUMINAIRE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Patera

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

BRNO 2024



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Jan Patera

ID: 186553

Ročník: 2

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Chytré solární svítidlo

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Solárně napájená svítidla, obecný přehled a stav techniky
2. Požadavky na napájení, potenciál solární energie v dané zeměpisné poloze
3. Možnosti redukce spotřeby a regulace osvětlení v závislosti na uložené energii
4. Inteligentní prvky pro osvětlení
5. Konstrukční návrh testovacího prototypu
6. Ověření konstrukce, sestavení prototypu
7. Testování a měření na prototypu

DOPORUČENÁ LITERATURA:

doporučená literatura podle pokynů vedoucího závěrečné práce

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 20.5.2024

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem, konstrukcí, měřením světelně technických veličin a energetické náročnosti na testovacím prototypu chytrého solárního svítidla.

Cílem práce bylo vytvořit rešerši solárně napájených svítidel a zjistit potenciál solární energie na území České republiky. Dále zjistit a využít metody pro úsporu elektrické energie v závislosti na jejím uloženém množství a potřebě osvětlení.

Praktická část je zaměřena na samotný návrh, konstrukci a měření na vyrobeném prototypu svítidla. Je zde popsán využitý algoritmus pro změnu náhradní teploty chromatičnosti během dne a aplikace pro ovládání svítidla. Jsou zde uvedeny naměřené hodnoty světelně technických a elektrických veličin. V poslední části jsou uvedeny nedostatky prototypu a možné návrhy na jeho vylepšení.

Klíčová slova

Solární svítidlo, integrativní svítidlo, chytré svítidlo, náhradní teplota chromatičnosti svítidla, jas svítidla.

Abstract

This diploma thesis deals with designs, constructions, measurement of light technical parameters and energy consumption on a test prototype of a smart solar light fixture.

The goal of the work was to create a survey of solar-powered lighting fixtures and to determine the potential of solar energy in the Czech Republic. Furthermore, find out and use methods for saving electrical energy depending on its stored amount and the need for lighting.

The practical part is focused on the actual design, construction and measurement on the manufactured prototype of the light fixture. The algorithm used for changing the substitute chromaticity temperature during the day and the application for controlling the light fixture are described here. The measured values of light technical and electrical quantities are listed here. In the last part, the shortcomings of the prototype and possible suggestions for its improvement are presented.

Keywords

Solar lamp, integrative lamp, smart lamp, substitute chromaticity temperature of the lamp, brightness of the lamp.

Bibliografická citace

Citace tištěné práce:

PATERA, Jan. *Chytré solární svítidlo*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/155575>. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Petr Baxant.

Citace elektronického zdroje:

PATERA, Jan. *Chytré solární svítidlo* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-10-11]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/155575>. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Petr Baxant.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Jan Patera
VUT ID studenta:	186553
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2023/24
Téma závěrečné práce:	Chytré solární svítidlo

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 20.května 2024

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petru Baxantovi, Ph.D. za odbornou pomoc a další cenné rady jak při zpracování mé diplomové práce, tak při profesním i osobním rozvoji. Poděkování patří také mé nejbližší rodině, i té vzdálené, které mne léta podporovaly při studiu a dalších těžkých chvílích.

V Brně dne: 20. května

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK.....	12
ÚVOD	13
1. SVĚTELNÁ TECHNIKA.....	14
1.1 ZÁKLADNÍ SVĚTELNĚ TECHNICKÉ VELIČINY	14
1.1.1 Světlo.....	14
1.1.2 Světelný tok	15
1.1.3 Spektrální citlivost zraku.....	16
1.1.4 Prostorový úhel.....	17
1.1.5 Svítivost.....	18
1.1.6 Osvětlenost.....	19
1.1.7 Jas.....	20
1.1.8 Světlení.....	21
1.1.9 Měrný výkon.....	21
1.1.10 Index podání barev	22
1.2 SVĚTELNÉ ZDROJE	22
1.2.1 Světelný tok	22
1.2.2 Teplota chromatičnosti	22
1.2.3 Životnost.....	23
1.3 SVÍTIDLA	23
1.3.1 Základní rozdělení svítidel.....	23
1.3.2 Základní parametry svítidel	24
1.3.3 Světelně činné části svítidel.....	24
2. CHYTRÁ SVÍTIDLA	25
2.1 CHYTRÝ DŮM	25
2.2 CHYTRÉ OSVĚTLENÍ.....	25
2.3 CHYTRÉ SOLÁRNÍ POULIČNÍ OSVĚTLENÍ	26
2.3.1 Dělené solární pouliční osvětlení.....	26
2.3.2 All – in – one solární pouliční osvětlení.....	26
2.3.3 Inteligence solárního pouličního osvětlení	27
2.3.4 Řídící systém solárního pouličního osvětlení	27
2.3.5 Solární pouliční svítidlo série PV5 vše v jednom.....	29
2.3.6 Solární pouliční svítidlo série PV4 vše v jednom	30
2.3.7 Solární pouliční osvětlení řady N.....	31
2.3.8 Solární pouliční svítidlo řady PV Split Type	32
2.3.9 Solární pouliční svítidlo ST43/ST44.....	33
2.3.10 Solární pouliční svítidlo SR-ALI.....	34
2.4 PHILIPS HUE	35
2.5 ZAHRADNÍ A PŘENOSNÉ OSVĚTLENÍ	36
2.5.1 Venkovní solární svítidlo Calex	36
2.5.2 Venkovní solární svítidlo Immax Neo Lite Bubbles.....	36
2.5.3 Přenosné solární svítidlo Mpowerd Luci Connect	37

2.5.4	Přenosné svítidlo EcoFlow Camping Light	38
3.	INTEGRATIVNÍ OSVĚTLENÍ	39
3.1	LIDSKÝ ZRAKOVÝ SYSTÉM	39
3.2	VIZUÁLNÍ A NEVIZUÁLNÍ SYSTÉM.....	41
3.2.1	Melatonin.....	42
3.2.2	Serotonin.....	43
3.2.3	Kortizol	43
3.2.4	Opsiny.....	44
3.2.5	Metoda výpočtu hodnocení světla na člověka	47
3.2.6	Kruithofův diagram.....	47
3.3	PLNOSPEKTRÁLNÍ OSVĚTLENÍ.....	48
3.4	BIODYNAMICKÉ OSVĚTLENÍ	49
3.4.1	Vitae	50
4.	NAPÁJENÍ SOLÁRNÍCH SVÍTIDEL.....	52
4.1	FOTOVOLTAICKÉ PANELE	52
4.1.1	Články první generace	53
4.1.2	Články druhé generace	53
4.1.3	Články třetí generace	53
4.1.4	Monokrystalické články.....	53
4.1.5	Polykrystalické články.....	54
4.1.6	Články z amorfního křemíku	54
4.2	STRÍDAČE	54
4.3	AKUMULACE ENERGIE	55
4.3.1	Olověné baterie.....	55
4.3.2	Lithiové akumulátory	55
4.3.3	Lithium – železofosfátové baterie.....	56
4.3.4	Průtokové baterie.....	56
4.4	POTENCIÁL SOLÁRNÍ ENERGIE	57
5.	NÁVRH SOLÁRNÍHO SVÍTIDLA.....	60
5.1	SOUČÁSTKY VYBRANÉ PRO TESTOVACÍ PROTOTYP	61
6.	KONSTRUKCE SOLÁRNÍHO SVÍTIDLA	62
6.1	SOUČÁSTKY VYBRANÉ PRO KONSTRUKCI PROTOTYPU	62
6.2	AUTOMATICKÝ REŽIM	64
6.3	AUTOMATICKÝ REŽIM – OVLÁDÁNÍ	66
6.4	MANUÁLNÍ REŽIM – OVLÁDÁNÍ	70
6.5	ÚSPORA ENERGIE.....	71
6.6	ZDOKONALENÍ KONSTRUKCE.....	72
6.7	POUŽITÁ KONSTRUKCE SVÍTIDLA	72
7.	MĚŘENÍ NA PROTOTYPU.....	73
7.1	MĚŘENÍ POMOCÍ RUČNÍHO SPEKTROMETRU	73
7.2	SPOTŘEBA ELEKTRICKÉ ENERGIE.....	75
7.3	SOLÁRNÍ NAPÁJENÍ BATERIÍ.....	76
7.4	NAPÁJENÍ BATERIÍ Z DISTRIBUČNÍ SÍTĚ.....	76
7.5	FOTODOKUMENTACE.....	78

7.6	MĚŘENÍ DOBY PROVOZU V AUTOMATICKÉM REŽIMU SVÍCENÍ	79
7.6.1	<i>Další nutné zdokonalení konstrukce</i>	79
7.6.2	<i>Možná doba provozu</i>	80
7.7	NÁVRHY NA VYLEPŠENÍ SOUČASNÉHO PROTOTYPU	80
7.7.1	<i>Funkce chytrého svítidla – rekapitulace</i>	80
7.7.2	<i>Hardwarová část</i>	80
7.7.3	<i>Softwarová část</i>	81
8.	ZÁVĚR	82
	LITERATURA	84
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	89
	SEZNAM PŘÍLOH	91

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Rozložení barev ve spektrální oblasti viditelného záření [3].....	15
Obrázek 2: Poměrná spektrální citlivost zraku normálního fotometrického pozorovatele [2].....	17
Obrázek 3: Určení prostorového úhlu elementu plochy [1]	18
Obrázek 4: Příklad fotometrického prostoru s vyznačenou křivkou svítivosti [2].....	19
Obrázek 5: Definice osvětlenosti bodového zdroje [2].....	20
Obrázek 6: Znázornění definice jasů [2].....	21
Obrázek 7: Rozložení světelného toku svítidel [2]	24
Obrázek 8: Příklad konfigurace děleného solárního pouličního osvětlení [7]	26
Obrázek 9: Příklad konfigurace kompaktního solárního pouličního osvětlení [8].....	27
Obrázek 10: Solární pouliční svítidlo PV5 – pohled zespod [12].....	30
Obrázek 11: Solární pouliční svítidlo PV5 – pohled shora [12]	30
Obrázek 12: Solární pouliční svítidlo PV4 – pohled zespod [13].....	31
Obrázek 13: Solární pouliční svítidlo PV4 – pohled shora [13]	31
Obrázek 14: Solární pouliční osvětlení N – oba pohledy [14].....	32
Obrázek 15: Solární pouliční svítidlo PV Split Type – oba pohledy [15].....	33
Obrázek 16: Solární pouliční svítidlo ST43/ST44 [17]	34
Obrázek 17: Solární pouliční svítidlo SR-AL1 – oba pohledy [18].....	34
Obrázek 18: Nástěnné venkovní solární svítidlo Calex [21].....	36
Obrázek 19: Venkovní solární svítidlo Immax Neo Lite Bubbles [22]	37
Obrázek 20: Přenosné solární svítidlo Mpowerd Luci Connect [25]	38
Obrázek 21: Přenosné svítidlo EcoFlow Camping Light [26]	38
Obrázek 22: Lidský zrakový orgán [2]	40
Obrázek 23: Základní zobrazení sítnice [2]	40
Obrázek 24: Lidské oko s detailním zobrazením sítnice [27].....	41
Obrázek 25: Vizualní a nevizualní systém vnímání světla [29]	42
Obrázek 26: Průběh hladin melatoninu a kortizolu v lidském těle [30].....	43
Obrázek 27: Absorpční spektrum fotoreceptorů oční sítnice [31]	44
Obrázek 28: Schéma propojení jednotlivých fotopigmentů oka [31]	45
Obrázek 29: Citlivost cirkadiálního systému [31].....	46
Obrázek 30: Spektrální citlivost cirkadiálního systému lineárního modelu [31]	46
Obrázek 31: Kruithofův diagram [34]	47
Obrázek 32: Spektrální křivka poledního slunečního záření [36].....	48
Obrázek 33: Spektrální křivka Spectrasol [36]	49
Obrázek 34: Spektrum oranžové fáze Vitae [39].....	51
Obrázek 35: Spektrum teple bílé a jasně bílé barvy světla (zleva) [39].....	51
Obrázek 36: Náhradní schéma fotovoltaického článku [40]	52
Obrázek 37: Princip průtokové baterie [40].....	57
Obrázek 38: Statistické rozložení specifického výkonu pro Jihomoravský kraj [46]	59
Obrázek 39: Dlouhodobý světový průměr GHI, upraveno z [45].....	59
Obrázek 40: Blokové schéma testovacího prototypu (ProfiCAD).....	61
Obrázek 41: Schéma zapojení solárního svítidla (AutoCAD)	63
Obrázek 42: Aplikace Svitidlo – postup párování	66
Obrázek 43: Aplikace Svitidlo – postup párování – pokračování.....	67
Obrázek 44: Aplikace Svitidlo – režimy Ovládání spínače a Detektor pohybu.....	68
Obrázek 45: Aplikace Svitidlo – režim Sensoru osvětlení a změna aktivační hodnoty	69
Obrázek 46: Aplikace Svitidlo – manuální režim.....	70

Obrázek 47: Aplikace Svitidlo – manuální režim – pokračování	71
Obrázek 48: Grafická závislost náhradní teploty chromatičnosti svítidla na střídě světelných zdrojů	74
Obrázek 49: Spektrální křivka pro LED 1 800 K	74
Obrázek 50: Spektrální křivka pro LED 6 500 K	75
Obrázek 51: Aplikace Svitidlo – měření spotřeby elektrické energie	76
Obrázek 52: Schéma zapojení solárního svítidla (AutoCAD) – po zdokonalení konstrukce.....	77
Obrázek 53: Svítidlo – pohled zepředu se signalizací a PIR senzorem (vlevo) a pohled zezadu se soumrakovým senzorem a napájecím konektorem (vpravo)	78
Obrázek 54: Konstrukční prototyp svítidla	78

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Barevné tóny světla ve viditelné oblasti [2].....	15
Tabulka 2: Solární pouliční svítidlo PV5 – možnosti konfigurace [12].....	29
Tabulka 3: Solární pouliční svítidlo PV4 – možnosti konfigurace [13].....	30
Tabulka 4: Solární pouliční osvětlení řady N – možnosti konfigurace [14]	31
Tabulka 5: Solární pouliční svítidlo PV Split Type – možnosti konfigurace [15].....	32
Tabulka 6: Solární pouliční svítidlo ST43/ST44 – možnosti konfigurace [17]	33
Tabulka 7: Solární pouliční svítidlo SR-AL1– možnosti konfigurace [18]	34
Tabulka 8: Technické parametry žárovky Vitae DEN [39]	51
Tabulka 9: Účinnosti jednotlivých typů FV článků [40].....	54
Tabulka 10: Statistika specifického výnosu pro Jihomoravský kraj [46].....	58
Tabulka 11: Specifické veličiny FV potenciálu pro Jihomoravský kraj [46].....	59
Tabulka 12: Teplota chromatičnosti svítidla v automatickém režimu	64
Tabulka 13: Tabulka naměřených hodnot náhradní teploty chromatičnosti v manuálním režimu	73

ÚVOD

Elektroenergetika zahrnuje procesy výroby, kvalitativní přeměny, přenos a rozvod až po konečné využití elektrické energie. Odehrává se tak v elektrárnách, trafostanicích, přenosových, distribučních a průmyslových sítích a v koncových zařízeních, kde je obvykle elektrická energie měněna na jiný druh energie. Nejčastěji bývá elektrická energie transformována na mechanickou, tepelnou nebo světelnou energii.

Umělé osvětlení bylo prvním podnětem elektrifikace za průmyslové revoluce. Má své důležité místo v roli spotřeby elektrické energie. Na světelnou techniku se dnes průměrně spotřebovává okolo deseti procent celkové spotřebované elektrické energie, zpočátku to však byl majoritní podíl. Tato hodnota je dosažena i díky moderním led svítidlům, u kterých se do budoucna předpokládá zdokonalení ve formě vyššího indexu podání barev a většího měrného výkonu, tím pádem k dalšímu snížení spotřeby. Nesmíme zapomenout, že každý technický pokrok má své limity.

Současná populace tráví spoustu času v uzavřených prostorách. Proto je kladen důraz na kvalitu osvětlení. Světlo, ve kterém trávíme čas, má vliv na zrakovou pohodu (výkon ale následně i na zdraví jedince). Jestliže však tyto požadavky na kvalitu osvětlení splněny nejsou, může docházet k problémům jako jsou bolesti hlavy, pálení očí, únava, pocit suchých očí, může následovat stres, deprese a jiné zdravotní problémy.

Tato diplomová práce bude sloužit jako součást většího projektu. Možným cílem je energetická samostatnost jedince, do budoucna například celého objektu. Přenosnost svítidla by mohla napomoci k možnosti trávení více volného času mimo obytné prostory za snížených světelných podmínek. Dalším cílem je pokus o obnovu tvořivosti vlastních projektů a nespolehání se na vymyšlené. Model může sloužit také k měření světelných veličin či k pozorování kvality osvětlení na pozorovatele.

1. SVĚTELNÁ TECHNIKA

1.1 Základní světelně technické veličiny

Lidský zrakový orgán nemá schopnost vnímat souhrnné působení světla za určitou dobu. Pro vlastní vidění je rozhodující výkon, tedy zářivý tok zdroje nebo zdrojů, a především prostorové rozložení těchto zdrojů. Není tedy důležité sledovat celkové množství světelné energie vyzářené zdroji za určitý čas [1].

Ve světelné technice se při hodnocení kvality osvětlení posuzuje, do jaké míry osvětlení napomáhá postupu přijetí a zpracování informace přenášené světlem, a usnadňuje proces vidění a vznik zrakového vjemu. Proto se zde neposuzují energetické veličiny, jako jsou zářivý tok¹, zářivost² atd., ale pracuje se s fotometrickými veličinami a pojmy, které respektují proměnlivou citlivost oka pozorovatele k záření různých vlnových délek. Pro jednotnost výpočtů se počítá s hodnotami spektrální citlivosti oka tzv. normálního fotometrického pozorovatele [1].

1.1.1 Světlo

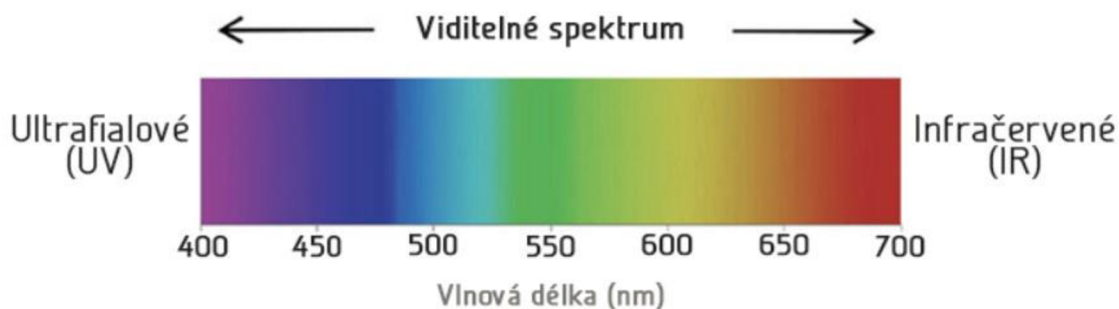
Světelné záření je elektromagnetické záření, které je prostřednictvím zrakového orgánu schopno vyvolat zrakový vjem. Toto záření je obvykle charakterizováno jeho vlnovou délkou. Viditelné spektrum záření se udává v rozmezí $\lambda = 380 \div 780$ nm, ale může se pro jednotlivé pozorovatele lišit. Oblast kratších vlnových záření se nazývá ultrafialové záření a oblast delších vlnových délek se nazývá infračervené záření [2].

Ke vzniku světla ve světelných zdrojích dochází na čtyřech základních principech. Prvním je zahřátí pevné látky na vysokou teplotu, kde jsou představiteli obyčejné a halogenové žárovky. Druhým principem je vybuzení atomu v elektrickém výboji. Zástupci jsou nízkotlaké a vysokotlaké výbojové zdroje. Třetím principem je fotoluminiscence, ke které dochází v luminoforu, což je povlak nanesený na vnitřní povrch výbojové trubice. Posledním principem je rekombinace páru elektron – díra na PN přechodu za vyzáření fotonu v LED diodách [2].

V primárních zdrojích vzniká světlo přímou přeměnou energie, kdežto v sekundárních zdrojích vzniká světlo odrazem od povrchu, popřípadě prostupem prostředím. Barevné vlastnosti primárních světelných zdrojů popisuje chromatičnost nebo jejich index barevného podání R_a . Barevné vlastnosti sekundárních světelných zdrojů se nazývají kolorita. Světlo způsobuje jak zrakový vjem, tak barevný počitek, který je závislý na vlnové délce světla. Každému barevnému počítku odpovídá konkrétní spektrální barva, která je popsána barevným tónem. Barevné složení viditelného světla je znázorněno na Obrázek 1 a popsáno v Tabulka 1 [2].

¹ Zářivý tok je velikost výkonu, který záření vysílá, přenáší nebo přijímá za jednotku času.

² Zářivost je schopnost světelného zdroje vyzářovat ve sledovaném úhlu.



Obrázek 1: Rozložení barev ve spektrální oblasti viditelného záření [3]

Tabulka 1: Barevné tóny světla ve viditelné oblasti [2]

Vlnová délka λ [nm]	Barevný tón spektrální barvy
380 ÷ 420	Fialová
420 ÷ 440	Modrofialová
440 ÷ 460	Modrá
460 ÷ 510	Modrozelená
510 ÷ 560	Zelená
560 ÷ 590	Žlutá
590 ÷ 650	Oranžová
650 ÷ 780	Červená

1.1.2 Světelný tok

Výkon neboli zářivá energie se měří ve wattech jako výkon obecně, ale světelný výkon se měří a udává v lumenech. Základní jednotkou světelné techniky je tedy lumen, který vyjadřuje výkon světelného zdroje v ekvivalentu, který lze vyhodnotit lidským zrakem. Z pohledu hygienických předpisů se sleduje osvětlenost, která udává množství světelného toku dopadajícího na osvětlovanou plochu.

Jednotky světelně technických veličin se v soustavě SI odvozují od základní jednotky svítivosti 1 kandela. Jedna kandela odpovídá monochromatické svítivosti zdroje záření o frekvenci záření $f = 540 \cdot 10^{12}$ Hz se zářivostí $1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$ v daném směru [2].

Frekvence takového záření odpovídá ve standardním ovzduší tzv. základní vlnové délce

$$\lambda_m = \frac{c}{f} = \frac{2,997\,086\,4 \cdot 10^8}{540 \cdot 10^{12}} \approx 555 \text{ nm}, \quad (1.1)$$

kde c je rychlost světla ve standardním prostředí (teplota 20 °C, relativní vlhkost 50 %, tlak 1 013,247 2 hPa a index lomu $N = 1,000\,279\,668$) určená z rychlosti světla ve vakuu vztahem [1]

$$c = \frac{c_0}{N} = \frac{2,997\,924\,59 \cdot 10^8}{1,000\,279\,668} = 2,997,86\,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (1.2)$$

Světelný tok odpovídá zářivému toku a vyjadřuje schopnost zářivého toku způsobit zrakový vjem, resp. zrakový počitek. Světelný tok Φ monochromatického záření vlnové délky λ , jehož zářivý tok je Φ_e , se určí pomocí vztahu

$$\Phi(\lambda) = K(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda), \quad (1.3)$$

kde $K(\lambda)$ je světelný účinek monochromatického záření, který je roven poměru světelného toku a jemu odpovídajícímu zářivému toku. Obvykle se $K(\lambda)$ vyjadřuje součinem maximální hodnoty K_m spektrálního průběhu $K(\lambda)$ a světelné účinnosti $V(\lambda)$ monochromatického záření

$$K(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda), \quad (1.4)$$

kde $V(\lambda)$ je světelná účinnost monochromatického záření definována jako [1]

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m}. \quad (1.5)$$

1.1.3 Spektrální citlivost zraku

Z hlediska individuálního pozorovatele je veličina $V(\lambda)$ totožná s poměrnou spektrální citlivostí zraku pozorovatele. Obvykle se udává spektrální citlivost normálního fotometrického pozorovatele při fotopickém, tzn. denním, vidění [1].

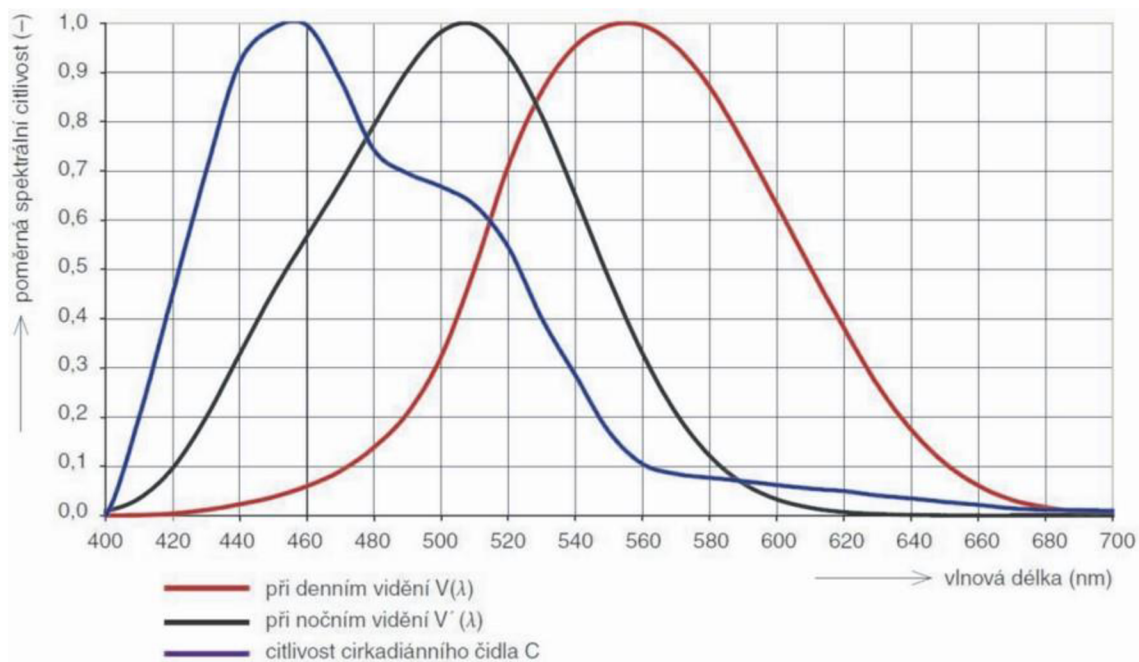
Mezinárodní organizace pro standardizaci (ISO) a mezinárodní komise pro osvětlování (CIE) schválily v souladu s definicí kandely, že maximum K_m světelného účinku záření $K(\lambda)$ odpovídající monofrekvenčnímu záření základní vlnové délky $\lambda_m = 555,015\,5 \text{ nm}$ dosahuje u normálního fotometrického pozorovatele při denním vidění hodnoty $K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. Tato konstanta spojuje fyzikální fotometrii a optickou radiometrii [1].

Podobně jako pro denní vidění, tak pro noční (skotopické) vidění byly definovány veličiny $K'(\lambda)$ a $V'(\lambda)$. Spektrální průběhy poměrných spektrálních citlivostí zraku normálního fotometrického pozorovatele při denním a nočním vidění jsou zobrazeny na Obrázek 2 [1].

Dalším důsledkem definice kandely je platnost vztahu mezi denním a nočním viděním

$$K(555,015\,5) = K'(555,015\,5) = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}, \quad (1.6)$$

proto lze v těchto stavech vidění pracovat se světelnými toky v lumenech [1].



Obrázek 2: Poměrná spektrální citlivost zraku normálního fotometrického pozorovatele [2]

V obvyklých případech pracuje lidský zrak v podmínkách denního vidění. Fotopické vidění je spojeno zejména s činností očních čípků, což jsou fotoreceptory, které umožňují barevné vidění. Jako spodní mez adaptačního jasu, od které probíhá proces denního vidění, se nejčastěji uvažuje hladina jasu $3 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ [2].

Noční vidění je spojeno především s činností očních tyčinek, což jsou výrazně citlivější fotoreceptory než oční čípky. Adaptační jas se uvažuje v rozmezí tisíců $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ až setin $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$. Maximální citlivost zraku nastává při vlnové délce 507 nm [2].

Třetím druhem fotoreceptorů nacházejících se v oku, jsou fotoreceptory, obvykle označovány písmenem C. Jedná se o tzv. cirkadiánní čidla, která jsou součástí gangliových buněk, zajišťujících řízení biologických pochodů v přibližně 24hodinovém cirkadiánním cyklu. Tento cyklus je spojen s pravidelným střídáním světla a tmy v závislosti na otáčení Země kolem Slunce. Projevuje se aktivní fází ve dne a klidovou fází v noci, a také se jím řídí většina biorytmů, např. tělesná teplota, krevní tlak, tepová frekvence a ladění organismu k práci či odpočinku. Poměrná spektrální křivka těchto fotoreceptorů má maximum v ještě kratších vlnových délkách, a to kolo 462 nm [2].

Oční tyčinky nejsou stejně citlivé na všechny barvy. Nejcitlivější jsou na modrofialovou barvu, naopak jsou méně citlivé na červenožlutou barvu. Při malých jasech se tedy rozeznává modré světlo lépe než červené světlo, tzv. Purkyňův jev [2].

1.1.4 Prostorový úhel

Prostorový úhel představuje část prostoru, který je vymezen kuželovou plochou, jenž na

kouli o poloměru r vytvoří plochu A . Vrchol tohoto kužele je ve středu koule. Velikost prostorového úhlu, pod kterým lze vidět plochu A ze středu koule, se určí vztahem

$$\Omega = \frac{A}{r^2}, \quad (1.7)$$

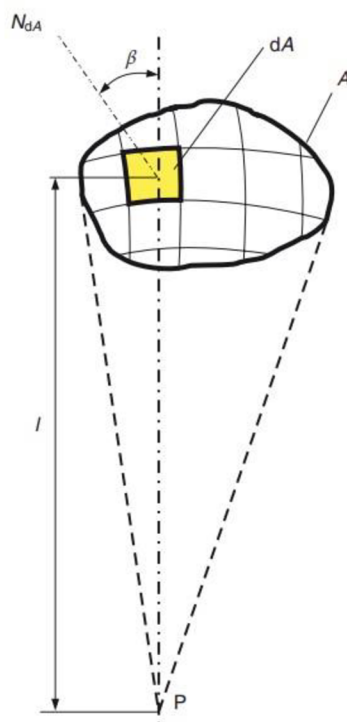
kde Ω je prostorový úhel, A je plocha vytvořená kuželem představující daný prostorový úhel a r je poloměr. Pokud za A budeme uvažovat povrch celé koule, dostaneme maximální hodnotu prostorového úhlu [2]

$$A = 4 \cdot \pi \cdot r^2, \Omega_{\max} = 4 \cdot \pi. \quad (1.8)$$

Prostorový úhel elementu dA , který je vidět ze vzdálenosti l se určí podle

$$d\Omega = \frac{dA \cdot \cos\beta}{l^2}, \quad (1.9)$$

kde β je úhel mezi normálou N_{dA} a paprskem světla I [2].



Obrázek 3: Určení prostorového úhlu elementu plochy [1]

1.1.5 Svítivost

Svítivost je vektorová veličina udávající distribuci světelného záření do prostoru, tj. kolik světelného toku vyzáří zdroj v prostorovém úhlu do určitého směru. Střední hodnota svítivosti se určí ze světelného toku Φ vyzářujícím v jednotkovém prostorovém úhlu Ω

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}, \quad (1.10)$$

kde I je svítivost, $d\Phi$ je světelný tok a $d\Omega$ je prostorový úhel, do něhož je světelný tok vyzařován [2].

Svítivost se určuje pro bodový zdroj, takový zdroj má zanedbatelné rozměry vůči vzdálenosti bodu r , ke kterému se provádí kontrolní měření. Tato podmínka je vyjádřena poměrem vzdálenosti a rozměru

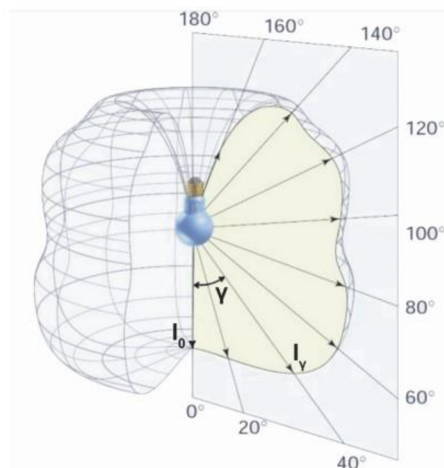
$$\frac{r}{a} > a, \quad (1.11)$$

v praxi je tento poměr požadován větší než 5, aby byl světelný zdroj brán jako bodový [2]. Pro velké zdroje se může stát, že by tato podmínka nebyla splněna. V tom případě můžeme velký zdroj rozdělit na zdroje menší vyhovující této podmínce. Výsledná svítivost je pak dána společným působením elementárních zdrojů.

Změřením svítivosti ve všech bodech prostoru okolo světelného zdroje a vynesením hodnot vektorů dostaneme prostorové rozložení svítivosti zdroje. V praxi se používají různé typy řezu touto plochou. V těchto polorovinách dostáváme křivky svítivosti, které se běžně vynášejí v polárních souřadnicích, které charakterizují distribuci světelného toku. Vztažný směr je obvykle shodný s normálou hlavní plochy svítivosti, od které se určují všechny úhly. Křivky svítivosti se určí pomocí vztahu

$$I_\gamma = I_0 \cdot f_1(\gamma), \quad (1.12)$$

kde I_γ je svítivost vztažená k úhlu γ , I_0 je vztažná svítivost a $f_1(\gamma)$ je funkce charakterizující křivku svítivosti v konkrétním řezu [2].



Obrázek 4: Příklad fotometrického prostoru s vyznačenou křivkou svítivosti [2]

1.1.6 Osvětlenost

Osvětlenost, nebo také intenzita osvětlení, udává hodnotu světelného toku, který dopadá na jednotkovou plochu. Osvětlenost je v praxi nejvíce sledovanou veličinou, jak již bylo

zmíněno dříve. Pro výpočet platí

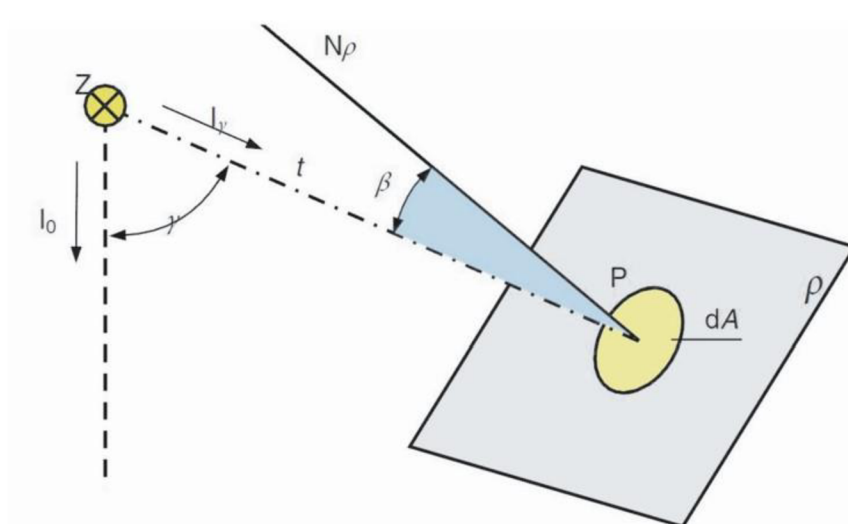
$$E = \frac{d\Phi}{dA}, \quad (1.13)$$

kde E je osvětlenost, $d\Phi$ je velikost světelného toku dopadlého na plochu a dA osvětlovaná plocha [2].

Druhým způsobem, jak vyjádřit osvětlenost je pomocí svítivosti za použití čtvercového a kosinového zákona. Na Obrázek 5 je zobrazena rovina ρ , na které je osvětlován bod P na ploše dA ze vzdálenosti l . Normála roviny N_ρ svírá s paprskem záření úhel β . Hodnota intenzity osvětlení pomocí svítivosti I_γ je

$$E = \frac{I_\gamma \cdot \cos\beta}{l^2}, \quad (1.14)$$

kde β je úhel svírající normálu plochy s dopadajícím paprskem a l je vzdálenost bodového zdroje od plochy. Z rovnice je zřejmé, že intenzita osvětlení v bodě P klesá s rostoucí vzdáleností l , z toho plyne tzv. čtvercový zákon. Osvětlenost je zároveň přímo úměrná hodnotě kosinu úhlu β , z čehož plyne kosinův zákon – se vzrůstajícím úhlem β klesá osvětlenost. Maximální osvětlenosti tedy lze dosáhnout pouze při nulovém úhlu mezi normálou sledované plochy a osvětlujícím paprskem světla. V tom případě mluvíme o normálové osvětlenosti E_n [2].

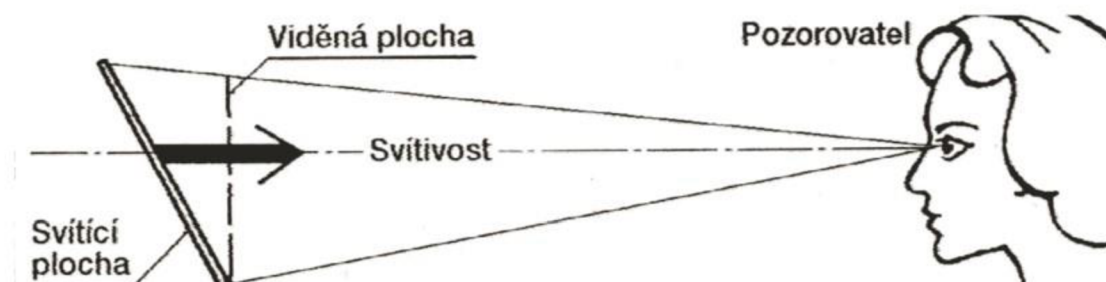


Obrázek 5: Definice osvětlenosti bodového zdroje [2]

1.1.7 Jas

Jas je definován jako měrná svítivost. Je určen plošnou a prostorovou hustotou světelného toku. Lidské oko přímo reaguje na kontrast jasu, u kterého nezáleží, zda jas svazku paprsků vychází přímo ze zdroje záření, či je odražen od libovolné plochy. Proto záleží na poloze pozorovatele a na směru jeho pohledu [2]. Jinými slovy lze jas vyjádřit jako poměr svítivosti ku průmětné ploše na směr pozorování. Matematicky vyjádřeno

$$L = \frac{I_{\gamma}}{dA \cdot \cos \gamma} \quad (1.15)$$



Obrázek 6: Znázornění definice jasu [2]

1.1.8 Světlení

U osvětlení světelný tok dopadá na osvětlovanou plochu. Světlení vyjadřuje světelný tok, který z plochy vyzařuje, popřípadě je od ní odražen. Světlení definuje plošnou hustotu světelného toku $d\Phi_V$, jenž je vyzařován z plochy dA . Vyjadřuje tedy velikost světelného toku vycházejícího z této plochy dA , vyjádřeno

$$M = \frac{d\Phi_V}{dA}, \quad (1.16)$$

kde M je světlení, $d\Phi_V$ je plošná hustota světelného toku a dA je plocha, ze které vychází světelný tok [2].

1.1.9 Měrný výkon

U světelných zdrojů ověřujeme úroveň přeměny elektrické energie na světelnou. Měrný výkon je definován jako podíl světelného toku Φ a elektrického příkonu P . Tato veličina udává, jakou hodnotu světelného toku lze získat z jednoho wattu. Můžeme tedy psát

$$\eta_P = \frac{\Phi}{P}, \quad (1.17)$$

kde η_P je měrný světelný výkon, Φ je světelný tok a P je elektrické příkon [2]. U zdrojů bez předřadníku (např. žárovky) je udávaný výkon shodný s příkonem světelného zdroje. U zdrojů s předřadníkem (např. zářivky a výbojky) je nutné definovat měrný příkon. Měrný příkon je roven měrnému výkonu zvětšenému o výkon, který spotřebuje předřadník [2]. Měrný výkon se běžně pohybuje v rozmezí $10 \div 200 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. Různé typy světelných zdrojů podle jejich konstrukce mají různá spektrální složení světla. Wolframové žárovky při svém nízkém měrném výkonu poskytují spojité spektrum záření, proto mají nejvyšší index podání barev. U nízkotlakých sodíkových výbojek je to naopak. Při jejich relativně vysokém měrném výkonu vyzařují téměř monochromatické záření, a proto mají nejnižší index podání barev.

1.1.10 Index podání barev

Lidské oko je přirozeně přizpůsobeno záření tepelných zdrojů, jakou jsou sluneční záření a žárovky. Pod tímto světlem jsme zvyklí vnímat barvy, a proto tyto záření považujeme za referenční. Barevný vjem je ovlivněn spektrálním složením světla osvětlujícího předmět, spektrální odrazivostí a spektrální propustností osvětlovaného materiálu. Dále může barevný vjem ovlivnit odlišná citlivost k jednotlivým barvám, úhel zorného pole a adaptace zraku. Všeobecný index podání barev R_a byl zaveden z toho důvodu, aby bylo možné určit, jaký vliv na barevné vnímání má zdroj s odlišným spektrálním složením světla. Index podání barev vyjadřuje stupeň shody vnímání barev předmětů pod zkoumaným zdrojem a pod referenčním *teplotním zdrojem*. Index je udáván v číselné podobě v rozmezí $0 \div 100$, kde hodnota 100 udává barevnou shodu a hodnota nula vypovídá, že barvu nelze s jistotou určit. Hodnocení probíhá na základě porovnání osmi až čtrnácti barevných vzorků [2].

1.2 Světelné zdroje

Světelné zdroje jsou základním prvkem osvětlovacích soustav. Správnou volbou světelného zdroje je možné ovlivnit, jak kvalitní a hospodárná bude celá osvětlovací soustava [2].

Základní parametry, které popisují vlastnosti světelných zdrojů jsou světelný tok, měrný výkon (viz kap. 1.1.9), index podání barev, náhradní teplota chromatičnosti a životnost. Kromě světelných vlastností světelných zdrojů jsou důležité také geometrické vlastnosti, mezi něž patří rozměr, druh patice, provozní poloha a teplota zdroje [2]. Další důležité údaje jsou jmenovité napětí a jmenovitý příkon.

1.2.1 Světelný tok

Světelný tok byl popsán v kapitole 1.1.2. Hodnota světelného toku je uváděna na obalu světelného zdroje, popřípadě v jeho technickém katalogu.

1.2.2 Teplota chromatičnosti

Teplota chromatičnosti se používá k popisu barevných vlastností světla. U teplotních světelných zdrojů teplota chromatičnosti odpovídá teplotě vlákna, kdežto u ostatních světelných zdrojů je zaveden pojem náhradní teplota chromatičnosti, která odpovídá ekvivalentnímu tepelnému zdroji s podobným složením spektra [2]. Teplota chromatičnosti je taktéž uváděna na obalu světelného zdroje, či v technickém katalogu.

Dle teploty chromatičnosti se světelné zdroje dělí do tří kategorií barvy světla:

- Teplá bílá < 3 300 K,
- Neutrální bílá 3 300 ÷ 5000 K,
- Studená bílá > 5 000 K.

Různé světelné zdroje mohou mít stejnou barvu světla, ale vykazovat přitom různé podání barev. Index podání barev je popsán v kapitole 1.1.10.

1.2.3 Životnost

Životnost udává, jak dlouho vydrží daný světelný zdroj hospodárně fungovat. U žárovek je mezním stavem životnosti přepálení vlákna, kdežto u neteplných světelných zdrojů dochází během života k poklesu světelného toku. Může tedy svítit, ale je nevhodný a určený k výměně. Z tohoto důvodu se rozlišují dvě definice životnosti [2]:

- 1) *Průměrná životnost* je průměr životností jednotlivých světelných zdrojů osvětlovací soustavy provozované za předem stanovených podmínek. Doba průměrné životnosti je doba, za kterou bude svítit přesně polovina sledovaného počtu světelných zdrojů. Postupný úbytek světelných zdrojů je vyjádřen křivkou úmrtnosti.
- 2) *Užitečná životnost* je doba, dokud světelný tok zdroje neklesne na 80 % počáteční hodnoty světelného toku. U LED se běžně uvažuje 70 %.

Pro opětovné porovnání bude použita wolframová žárovka a nízkotlaká sodíková výbojka, kde žárovka má životnost okolo 1000 hodin a výbojka okolo 16 000 hodin [2].

1.3 Svítidla

Světelné zdroje se umísťují do svítidel za účelem redistribuce světelného toku do prostoru, snížení jasu, zajištění odolnosti proti okolním vlivům a pro usnadnění připojení do elektrické sítě. Další funkce, které svítidla splňují, jsou ochrana před nebezpečným dotykovým napětím, pohlcení případného výbuchu světelného zdroje a respektování estetického hlediska a ekonomiky výroby.

Svítidla se skládají ze světelně činných částí, elektrických a konstrukčních částí. Konstrukční části svítidla jsou tvořeny především tělesem, ochranným krytem a systémy pro uchycení tělesa k určenému povrchu a krytu ke svítidlu. Mezi elektrické části patří patice, svorkovnice, propojovací vodiče a případné předřadníky, startéry, kondenzátory, filtry a usměrňovače. Světelně činné části slouží ke změně rozložení světelného toku a k případné změně spektrálního složení světla. Používanými nástroji jsou zrcadlové či difúzní reflektory, rozptylovače, stínidla a filtry.

Svítidla musí splňovat podmínky snadné montáže, jednoduché údržby, dlouhé životnosti a spolehlivosti. Teplota, kterou svítidla dosahují důsledkem svého provozu, nesmí být nebezpečná pro jejich okolí [2].

1.3.1 Základní rozdělení svítidel

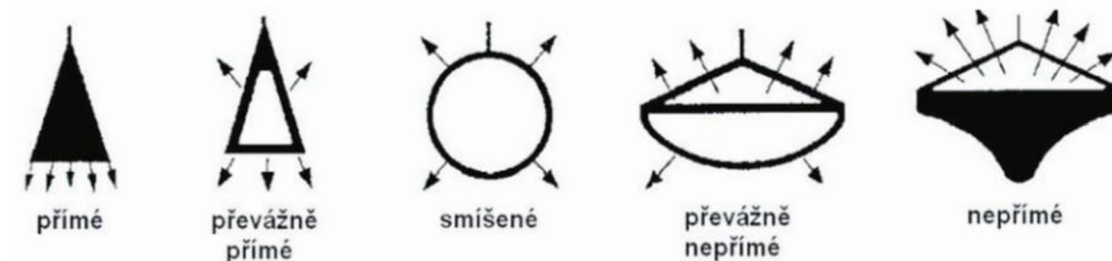
Základní dělení svítidel se provádí podle místa použití [2]:

- Vnitřní – průmyslová, kancelářská, bytová, osvětlení sportovišť,
- Venkovní – osvětlení komunikací, parková, architektonická, reflektorová, osvětlení sportovišť,

- Speciální – automobilové osvětlení, ruční svítilny, důlní svítidla.

Další možné dělení je podle typu montáže svítidla na závěsná, zápusťná, na stožár či konzolu, stojanová a přisazená, která se dále dělí na stropní a nástěnná [2].

Svítidla je možné třídit podle rozložení světelného toku viz Obrázek 7.



Obrázek 7: Rozložení světelného toku svítidel [2]

1.3.2 Základní parametry svítidel

Světelný tok svítidla, který je svítidlem opticky upraven, je rozdílem světelného toku všech světelných zdrojů svítidla a světelného toku ztraceného optickým zpracováním [2].

Účinnost svítidla je dána poměrem světelného toku svítidla ku světelnému toku světelných zdrojů svítidla. Účinnost svítidla charakterizuje jeho hospodárnost. Maximální účinnosti dosahuje samotný světelný zdroj, který však nelze použít z důvodů popsaných dříve, jako je nevhodné rozložení světelného toku, oslnění, okolní vlivy atd. Z hlediska hospodárnosti je požadováno dosahovat co nejvyšší hodnoty účinnosti. U běžných svítidel se účinnost pohybuje v rozmezí od 0,5 do 0,8. U světlometů a LED svítidel může účinnost svítidla být vyšší než 0,95 [2].

Jas svítidla je podíl svítivosti v daném směru a velikosti průmětu svítící plochy do roviny kolmé k uvažovanému směru. U svítidel určených k osvětlování vnitřních prostorů se obvykle udávají jasy v oblasti úhlů od 45° do 85° od vodorovného směru pohledu pro kontrolu na oslnění [2].

Úhel clonění je míra zaclonění světelného zdroje svítidlem. Úhel clonění udává nejmenší ostrý úhel mezi vodorovnou rovinou svítidla a přímkou, která spojuje okraj svítidla se světelným zdrojem. U žárovky tato přímka začíná v jejím vláknu, u ostatních světelných zdrojů na povrchu jejich baňky [2].

1.3.3 Světelně činné části svítidel

Reflektor mění rozložení světelného toku převážně pomocí zrcadlových odrazů. *Refraktor* rozděljuje světelný tok na základě optického zákona lomu. *Difuzor* neboli rozptylovač rozptyluje světelný tok odrazem nebo prostupem a vyzařuje světelný tok jako rovnoměrně rozptylná plocha. Rozlišují se difuzory s rozptylným odrazem a rozptylným prostupem. Další možností je kombinace těchto systémů [2].

2. CHYTRÁ SVÍTIDLA

2.1 Chytrý dům

Chytrý dům je takový dům, jehož spotřebiče a zařízení lze ovládat automaticky nebo ručně odkudkoli s připojením k internetu pomocí chytrého telefonu, tabletu nebo jiného síťového zařízení. Zařízení chytrého domu jsou vzájemně propojena, proto je lze ovládat pomocí jednoho výchozího rozhraní – nejčastěji aplikace. Takto lze ovládat například bezpečnostní systémy, jako jsou například kamery na objektu, zámky dveří atd., topnou soustavu, osvětlení, televizi a mnohé spotřebiče, jako je např. pračka, lednička atd [4].

Inteligentní domácnosti vznikly za účelem pohodlí uživatelů, možností vyhodnocení jejich využívání zařízení, a také snížení provozních nákladů. Jednotlivé komponenty lze mezi sebou propojovat bezdrátově, pevným připojením, popřípadě jejich kombinací. Pevné připojení se považuje za spolehlivější a bezpečnější, zato nákladnější [4].

2.2 Chytré osvětlení

Chytré osvětlení je obvykle realizováno integrativní žárovkou, integrativním svítidlem nebo integrativním LED páskem. Kromě funkce zapnout a vypnout mají integrativní svítidla spousty dalších možností využití. Pro příklad budou uvedeny možnosti využití svítidel firmy Loxone, které se mohou dle výrobce a požadavků investora lišit.

Stmívání – podle požadované činnosti lze upravovat intenzitu osvětlení. *Postupný náběh* – funkce náběhu a doběhu postupně rozsvěcí a zhasíná světelné zdroje. Tato funkce je vhodná pro zrakovou pohodu a prodlužuje životnost světelného zdroje. *Optický alarm* – blikání světla může být použito jako signalizace bezpečnostních čidel nebo se dá využít pro funkci zvonku v pozdních hodinách. *Simulace přítomnosti* – v době nepřítomnosti lze náhodně rozsvěcet svítidla pro simulaci přítomnosti. *Dětská pojistka* – tlačítka lze dle potřeby aktivovat a deaktivovat, v tomto případě je lze ovládat pouze z aplikace. *Úspora energie* – pokud se v místnosti nikdo nenachází, svítidla se automaticky zhasnou. Při odchodu z domu je možné všechna svítidla zhasnout odchodovým tlačítkem v aplikaci. *Buzení světlem* – intenzita světla postupně roste jako při východu slunce. *Noční světlo* – intenzita světla je nastavena tak, aby bylo možné se pohybovat po domě bez oslnění v noci. *Přizpůsobená intenzita* – svítidla se automaticky rozsvěcí v závislosti na čase a intenzitě slunečního záření [5]. Další funkcí může být hlasové ovládání.

Všechny tyto funkce lze ovládat přes aplikaci Loxone, která podporuje například standart DALI, což je protokol pro digitální řízení osvětlení nezávislý na výrobci pro stmívatelné elektronické předřadníky [5].

Ve stropních svítidlech může být instalován Bluetooth reproduktor. Některá přenosná svítidla slučují svou funkci s funkcí powerbanky.

2.3 Chytré solární pouliční osvětlení

Základními částmi každého adaptivního solárního svítidla jsou solární panel, regulátor nabíjení, baterie, LED svítidlo, ovládací senzory, řídicí elektronika a mechanické konstrukce jako jsou držáky atd [6].

Výhodou solárně napájených svítidel je předpoklad či možnost nepřipojit svítidlo do rozvodné sítě, tím pádem odpadají náklady na vybudování nové rozvodné sítě i za cenu vyšších pořizovacích nákladů solárně napájených svítidel. Další nespornou výhodou je úspora nákladů na spotřebu elektrické energie a pozitivní dopad na životní prostředí při provozu [6].

Podle typu konstrukce dělíme solární svítidla na dělená solární svítidla a kompaktní solární svítidla. Následující kapitoly jsou věnovány produktům firmy ZGSM [6].

2.3.1 Dělené solární pouliční osvětlení

V tomto typu konstrukce solárních svítidel jsou solární panely, baterie a svítidla instalovány samostatně. Za normálních okolností je solární panel umístěn v horní části osvětlovacího sloupu a svítidlo je pod tímto panelem. Baterii lze podle potřeby umístit pod solární panel, na osvětlovací sloup nebo pod zemský povrch. Díky samostatným částem je použití těchto svítidel flexibilní v konfiguraci a hojně využíváno [6].



Obrázek 8: Příklad konfigurace děleného solárního pouličního osvětlení [7]

2.3.2 All – in – one solární pouliční osvětlení

Na rozdíl od předchozího typu jsou všechny komponenty kompaktního osvětlení v jednom celku. Nevýhodou je nemožnost změny sklonu solárního panelu vůči svítidlu, naopak výhody jsou snadná přeprava a montáž a nižší pořizovací náklady [6].



Obrázek 9: Příklad konfigurace kompaktního solárního pouličního osvětlení [8]

2.3.3 Inteligence solárního pouličního osvětlení

Aby bylo možné snížit spotřebovanou elektrickou energii, obsahují svítidla inteligentní řídicí systém. Tento systém využívá stmívání, časování, pohybové senzory a bezdrátové ovládání. Další myšlenkou integrativního osvětlení je snížení světelného smogu, který není nezbytně nutný. Po západu slunce je potřebné osvětlení vytvářeno po určitou dobu a v čase, kdy se předpokládá snížení provozu, se svítidla stmívají. V případě detekce pohybu je zvýšen jas, a po definované době je opět snížen. Nad ránem se postupně jas zvyšuje podle předpokládaného nárůstu provozu a v době, kdy se předpokládá normální provoz, je znovu nastaveno potřebné osvětlení.

Toto snižování spotřeby energie zároveň prodlužuje životnost jednotlivých komponentů pouličního osvětlení, protože led diody a napájecí zdroje tak nedosahují provozního oteplení. Prodlužuje se i životnost baterie, která souvisí s počtem cyklů nabití a vybití, a také s hloubkou nabití a vybití závislých na typu použité baterie. Ve výsledku se tyto úspory projeví také na pořizovacích nákladech zařízení, protože je možné použít solární panel s menší plochou a zvolit baterii s menší kapacitou, což jsou komponenty tvořící přibližně 80 procent nákladů [9].

2.3.4 Řídicí systém solárního pouličního osvětlení

Jedním z nejjednodušších způsobů, jak řídit chod solárního osvětlení je použití tzv. solárního regulátoru, který reaguje na výstupní napětí solárního panelu. Intenzita slunečního záření určuje výstupní napětí solárního panelu neboli nabíjecí napětí regulátoru. Při nízké intenzitě slunečního záření je nabíjecí napětí regulátoru nízké, to dává popud sepnutí osvětlení. V opačném případě je intenzita slunečního záření vyšší, a to dává popud k vypnutí osvětlení. Podle použití solárního regulátoru nabíjení, podle použití senzorů a podle nastavených profilů časování lze řídicí systémy solárního pouličního osvětlení rozdělit do několika základních kategorií [9].

2.3.4.1 Solární pouliční osvětlení za slunečného dne

Při této konfiguraci budou svítidla svítit od soumraku do úsvitu. Pro úsporu energie je

možné využít časového stmívání. Myšlenkou časového stmívání je, že po půlnoci je předpoklad snížení provozu vozidel a chodců, a podle toho lze snížit osvětlenost na minimum požadované hygienickými předpisy dle ČSN EN 13201-2 [10]. Ušetřená elektrická energie je pak uchována například na deštivé dny. Křivku stmívání lze nastavit dle požadavků investora do čtyř až pěti profilů. Příklad: světlo svítí na 80 % do jedné hodiny po zapnutí světla, poté do půlnoci svítí na 100 %, mezi 0:00 až 4:00 svítidlo svítí na 30 % a od 4:00 do zhasnutí svítí znovu na 100 % [9].

2.3.4.2 Solární pouliční osvětlení za deštivého dne

Pokud jsou solární panel a baterie svítidla projektovány dle předchozího případu, je při nepříznivém počasí nevyhnutelně zkrácena doba svícení, nebo dokonce zcela nezajištěné osvětlení. Řešením této situace je předimenzování plochy solárního panelu a kapacity baterie, což je ekonomicky nevýhodné. Další možností je inteligentní řízení vybíjení baterie, které dokáže automaticky upravit příkon zátěže podle kapacity baterie. Při použití se systémem časového stmívání vybere vhodný výstupní příkon mezi nastaveným příkonem dle požadavků a nastaveným příkonem dle kapacity baterie. Příklad: pokud je kapacita baterie nižší než 40 %, inteligentní regulátor považuje správný příkon zátěže 60 %. Když je v tuto chvíli nastavena zátěž na 100 %, konečný příkon je 60 %. Zatímco pokud je nastaven příkon zátěže 20 %, konečný příkon osvětlení je 20 % [9].

2.3.4.3 Solární pouliční osvětlení s pohybovým senzorem

V předchozích dvou případech není možné upravovat příkon pouličního osvětlení na základě využití provozu v reálném čase. Při použití solárního pouličního osvětlení s pohybovým senzorem lze detekovat pohyb chodce nebo vozidla v jeho dosahu. Pokud pohybový senzor zaznamená pohyb, vyšle signál do řídicího systému, který zvýší příkon svítidla na požadovanou hodnotu. Pokud se chodec či vozidlo vzdálí, vyšle pohybový senzor obvyklé signály 5 V, 3 V nebo 0 V, které znamenají snížení příkonu na 50 %, 30 % nebo úplné zhasnutí [9]. Výhodou tohoto systému se vzájemnou komunikací je, že je možné předávat signály dalším svídlům, která tak mohou postupně začít snižovat nebo zvyšovat jas podle předpokládané trajektorie pohybujícího se předmětu či člověka.

2.3.4.4 Solární pouliční osvětlení s bezdrátovým ovládáním

Bezdrátové ovládání nabízí největší variabilitu bez nutnosti fyzických zásahů na osvětlení, které nabízí správu jednotlivých svítidel i veřejného osvětlení jako celku. V tomto systému může být integrována technologie internetu věcí (IoT)³, takže správci sítě mohou sledovat a ovládat systém a další městské senzory online, kdekoli v dostupnosti internetu. Bezdrátový řídicí systém solárního pouličního osvětlení může

³ Internet věcí je síť fyzických zařízení, vozidel, domácích spotřebičů a dalších zařízení, která jsou vybavena elektronikou, softwarem, senzory či čidly, a hlavně síťovou konektivitou. Ta umožňuje těmto zařízením se navzájem propojit a vyměňovat si data [11].

realizovat následující hlavní funkce [9]:

- Dálkové zapnutí nebo vypnutí svítidel. Po připojení řídicího systému k bezdrátovému modulu může ovládat zapínání a vypínání svítidel danými příkazy ze vzdáleného serveru.
- Dálkové ovládání příkonu a spínání svítidel. Například předčasné zapnutí svítidel při bouřce nebo regulace příkonu při mimořádných příležitostech.
- Dálková změna profilů. V různých ročních obdobích jsou nastaveny různé časové profily spínání a regulace příkonu.
- Dálkové monitorování stavu pouličního osvětlení v reálném čase. Tato funkce může signalizovat výskyt poruch, jejich místa a příčiny, což umožňuje urychlení procesu údržbových prací.

Příklad letního profilu stmívání: 100 % příkon od 19:00 do 23:00, poté 80 % příkon na dvě hodiny, následuje 50 % příkon od 1:00 do 4:00, a nakonec 80 % příkon na dvě hodiny. Příklad zimního profilu stmívání: 60 % příkonu od 17:00 do 19:00, poté 80 % příkonu na čtyři hodiny, následuje 30 % příkon od 1:00 do 4:00, a nakonec 50 % příkon na dvě hodiny [9].

2.3.5 Solární pouliční svítidlo série PV5 vše v jednom

Svítidlo PV5 je dle názvu v kompaktním provedení, které dosahuje měrného výkonu až $220 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. Díky této vysoké účinnosti konverze elektrické energie na světlo jsou kladeny minimální dosažitelné nároky na kapacitu baterie a plochu solárního panelu při zachování stejné hladiny osvětlení. Použitý monokrystalický solární panel má účinnost konverze 23 %, který přes solární regulátor s MPPT, což je sledování bodu maximálního výkonu na solárních panelech, nabíjí lithiovou baterii LiFePO₄ s nabíjecím cyklem vyšším než 2000krát. Svítidlo je vybaveno 2.4G bezdrátovou komunikací, která umožňuje realizovat dálkové ovládání [12].

Tabulka 2: Solární pouliční svítidlo PV5 – možnosti konfigurace [12]

Příkon	40 W, 50 W, 60 W, 80 W, 100 W, 120 W
Vstupní napětí	DC 12/24 V
Specifikace solárního panelu	Monokrystalický 65 W, 70 W, 100 W, 120 W
Kapacita baterie	230 až 691 Wh
Stupeň krytí IP	IP66
Odolnost IK	IK10
Teplota chromatičnosti	3000 K, 4000 K, 5000 K, 5700 K
Index podání barev	> 70, > 80
Provozní teplota	- 20 °C až + 60 °C
Možnosti řízení	Pohybový senzor, PIR senzor, časovač stmívání, senzor denního světla



Obrázek 10: Solární pouliční svítidlo PV5 – pohled zespod [12]



Obrázek 11: Solární pouliční svítidlo PV5 – pohled shora [12]

2.3.6 Solární pouliční svítidlo série PV4 vše v jednom

Svítidlo PV4 je nižší modelovou řadou série PV5 s nižším příkonem. Obě série jsou určeny k vertikální, horizontální nebo nástěnné montáži. Jsou zde instalovány ochrany proti podpětí a přebíjení baterie. Dosahovaný měrný výkon je až $200 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ [13].

Tabulka 3: Solární pouliční svítidlo PV4 – možnosti konfigurace [13]

Příkon	10 W, 20 W, 30 W, 50 W
Vstupní napětí	DC 12 V
Specifikace solárního panelu	Monokrystalický 12 W, 22 W, 35 W, 55 W
Kapacita baterie	LiFePO4 64 Wh, 128 Wh, 192 Wh, 268 Wh
Stupeň krytí IP	IP65
Odolnost IK	IK08
Teplota chromatičnosti	3000 K, 4000 K, 5000 K, 5700 K
Index podání barev	> 70, > 80
Provozní teplota	- 40 °C až + 50 °C
Možnosti řízení	PIR senzor, časovač stmívání, senzor denního světla



Obrázek 12: Solární pouliční svítidlo PV4 – pohled zespod [13]



Obrázek 13: Solární pouliční svítidlo PV4 – pohled shora [13]

2.3.7 Solární pouliční osvětlení řady N

Tento typ svítidla dosahuje měrného výkonu až $160 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. Nabízí možnost komunikace s dalšími zařízeními přes rozhraní Bluetooth, indikaci pracovního stavu a s tím související snadnou údržbu. Řada svítidel N je vybavena integrovaným systémem správy baterií BMS, který se stará o rovnovážný stav nabití mezi jednotlivými články baterie [14].

Tabulka 4: Solární pouliční osvětlení řady N – možnosti konfigurace [14]

Příkon	20 W, 30 W, 40 W, 50 W
Vstupní napětí	DC 12 V
Specifikace solárního panelu	Monokrystalický 50 W, 70 W, 100 W
Kapacita baterie	111 až 500 Wh
Stupeň krytí IP	IP65
Odolnost IK	IK08
Teplota chromatičnosti	3000 K, 4000 K, 5000 K, 5700 K
Index podání barev	> 70, > 80
Provozní teplota	- 40 °C až + 50 °C
Možnosti řízení	Pohybový senzor, PIR senzor, časovač stmívání, senzor denního světla



Obrázek 14: Solární pouliční osvětlení N – oba pohledy [14]

2.3.8 Solární pouliční svítidlo řady PV Split Type

PV Split Type je obecný název pro dělená solární pouliční svítidla, které mohou používat jakoukoliv z typů lamp z nabídky výrobků firmy ZGSM. To umožňuje široký rozsah příkonu svítidel od 20 do 200 W s měrným výkonem dle použitého typu svítidla. Díky dělené konstrukci je možné použití velkokapacitní konfigurace plochy solárních panelů a kapacity baterií [15].

Tabulka 5: Solární pouliční svítidlo PV Split Type – možnosti konfigurace [15]

Příkon	20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 150, 200 [W]
Vstupní napětí	DC 12/24 V
Specifikace solárního panelu	přizpůsobitelný
Kapacita baterie	přizpůsobitelná
Stupeň krytí IP	IP66
Odolnost IK	IK10
Teplota chromatičnosti	3000 K, 4000 K, 5000 K, 5700 K
Index podání barev	> 70, > 80
Provozní teplota	- 40 °C až + 50 °C
Možnosti řízení	Pohybový senzor, PIR senzor, časovač stmívání, senzor denního světla



Obrázek 15: Solární pouliční svítidlo PV Split Type – oba pohledy [15]

Chytrým solárním svítidlům s označením SMART můžeme přiřadit následující vlastnosti [16]:

S – udržitelný (sustainable),

M – moderní (Modern),

A – autonomní (Autonomous),

R – robustní a spolehlivý (Robust and Reliable),

T – technologicky pokročilý – připraveno na chytré město (Technologically advanced – smart city ready).

2.3.9 Solární pouliční svítidlo ST43/ST44

Svítidlo ST 43 je konkurenčním výrobkem firmy AGC Lightning pro svítidla PV5, PV4, N a PV Split Type. Dosahuje měrného výkonu až $200 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. Dodává se v šesti příkonových řadách se světelným tokem až 12 000 lm [17].

Tabulka 6: Solární pouliční svítidlo ST43/ST44 – možnosti konfigurace [17]

Příkon	10 W, 20 W, 30 W, 40 W, 50 W, 60 W
Stupeň krytí IP	IP65
Odolnost IK	IK08
Teplota chromatičnosti	4000 K, 3000 K, 5000 K
Index podání barev	80, 70
Provozní teplota	0 °C až + 50 °C
Možnosti řízení	PIR senzor, časovač stmívání



Obrázek 16: Solární pouliční svítidlo ST43/ST44 [17]

2.3.10 Solární pouliční svítidlo SR-AL1

Dalším obdobným výrobkem je svítidlo SR-AL1 firmy GermanLite. Použité solární panely mají účinnost konverze elektrické energie na světlo 21,1 % s životností 25 let. Instalovaná baterie LiFePO4 je vybavena ochranou proti zkratu, ochranou proti přebití a proti nadměrnému vybití. Měrný výkon dosahuje $160 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ [18].

Tabulka 7: Solární pouliční svítidlo SR-AL1 – možnosti konfigurace [18]

Příkon	20 W, 30 W, 40 W
Specifikace solárního panelu	Monokrystalický 40 W, 50 W, 65 W
Kapacita baterie	LiFePO4 30 Ah, 40 Ah, 50 Ah
Stupeň krytí IP	IP65
Teplota chromatičnosti	6500 K
Možnosti řízení	PIR senzor, časovač stmívání, senzor denního světla



Obrázek 17: Solární pouliční svítidlo SR-AL1 – oba pohledy [18]

2.4 Philips Hue

Philips Hue nabízí největší výběr v oblasti inteligentního osvětlení pro domácí použití v interiérových i exteriérových podmínkách. Jedná se o řadu adaptivních LED světelných zdrojů, LED svítidel a příslušenství, které slouží k propojení, napájení a ovládání systému Hue jako celku. Ovládat produkty lze nástěnnými vypínači, dálkovými ovladači, přes aplikaci Philips Hue a integrací s vybranými ostatními zařízeními inteligentní domácnosti, jako např. Samsung SmartThings [19], [20].

Pro maximální využití všech funkcí systému Hue je potřeba Hue Bridge, který je centrálním řídicím systémem s připojením k Wi-Fi. Připojení na dálku je využíváno hlavně k navození dojmu, že dům není prázdný, a také pro kontrolu zhasnutí. Bridge umožňuje ovládat svítidla přes mobilní aplikaci, dálkovými ovladači, hlasovými příkazy, popřípadě dalšími prvky inteligentní domácnosti. Se zařízeními komunikuje pomocí technologie Zigbee, která se vyznačuje rychlou odezvou a stabilním připojením. Každé zařízení je tedy vybaveno čipem Zigbee, které pak vytváří síť mesh. Hue Bridge může automaticky řídit osvětlení podle nastavených profilů, kdy uživatel prochází fázemi probouzení, odcházení z domu, návratu domů a usínání. Řídicí systém je pravidelně aktualizován z důvodu zabezpečení [19], [20].

Systém je možno využívat buďto v menší síti s omezenými vlastnostmi s propojením přes Bluetooth, nebo v rozsáhlejší síti se všemi dostupnými vlastnostmi, jak bylo zmíněno výše. Uživatelské rozhraní zůstává stejné, a to aplikace Philips Hue. Aplikace umožňuje seskupení jednotlivých svítidel do místností a zón, které lze ovládat najednou. Zařízení přitom mohou být zařazena do několika takovýchto skupin. Vytvořené skupiny, či jednotlivá svítidla lze zapínat, vypínat, snižovat nebo zvyšovat jejich jas a nastavovat barevné scény. Scény jsou k dispozici předem navržené s možností drobných úprav, popřípadě je možno si vytvořit vlastní scénu. Mezi často používané scény patří např. Polární záře nebo Západ slunce nad savanou. Systém lze také ovládat hlasově přes Google Assistant, Amazon Alexa, Apple Home a Siri [20].

Další z inteligentních funkcí systému Hue je přivítání světlem, kdy je systém schopen rozpoznat příchod uživatele do domu a zapnout světla, která byla při odchodu vypnuta tlačítkem odchodu, popřípadě byla vypnuta automaticky, když systém rozpoznal, že dům je prázdný. Systém lze využít také jako světelný alarm, obvykle blikající v předem nastaveném barevném tónu [20].

Philips Hue poskytuje širokou nabídku svítidel, světelných zdrojů a příslušenství. *Bílé žárovky* vydávají teplé bílé světlo pro vytvoření zrakové pohody. *White Ambiance žárovky* nabízí změnu náhradní teploty chromatičnosti od teplé bílé po studenou bílou a jsou ideální do prostor, kde se odehrává více činností v průběhu dne. *Barevné žárovky* jsou schopny produkovat miliony barev, jsou určeny pro vytváření světelných scén a pro multimediální synchronizaci. *Světelné pásy* umožňují zvýrazňující osvětlení pro efekt podsvícení nebo pro zvýraznění architektonických prvků. *Venkovní osvětlení* navržené pro odolání povětrnostním vlivům může být bodové, chodníkové a nástěnné. Za zmínku

dále stojí *Dimmer Switch*, což je dálkové ovládání nahrazující některé funkce aplikace jako je například stmívání svítidel, funkce vypínače a přepínání scén. Pro lepší odkládání je na zadní straně vybaven magnety. Dále *pohybový senzor*, který se používá pro méně obývané prostory, jako jsou chodby, šatny atd., pro zjednodušení procházení po domě. A nakonec *inteligentní zásuvka*, která umožňuje přidat do systému nekompatibilní výrobek, jako je ventilátor nebo stolní lampa [19].

Inteligentní osvětlení lze synchronizovat s PC přes desktopovou aplikaci Hue Sync dostupnou pro operační systémy Windows i macOS. Pro SMART televize je dostupná Hue Sync TV app. Software analyzuje barvy a zvuk médií v reálném čase a převádí je do dynamických světelných efektů. Cílem je simulovat přesah vjemu obrazovky u filmů a reakce na události ve hře. Je možno vybírat z režimů Video, Music a Game [19].

2.5 Zahradní a přenosné osvětlení

2.5.1 Venkovní solární svítidlo Calex

Nezávislé nástěnné LED svítidlo s provozní dobou až 15 hodin obsahuje senzor pohybu s dosahem 10 metrů. Dosahuje světelného toku až 250 lm a splňuje třídu ochrany IP44. Změnu barvy světla lze provést přes aplikaci Calex a hlasové ovládání Google Assistant, Amazon Alexa a Apple HomeKit. V nabídce je změna odstínu bílé barvy v rozmezí od 3000 K do 6500 K a více než 100 dalších barev. Další možností je nastavení jasu a výběr z předdefinovaných světelných scén s možností časovače [21].



Obrázek 18: Nástěnné venkovní solární svítidlo Calex [21]

2.5.2 Venkovní solární svítidlo Immax Neo Lite Bubbles

Nezávislé sloupkové LED svítidlo je určeno k orientačnímu osvětlení chodníků a příchodových cest. Je vybaveno světelným senzorem, který po setmění svítidlo automaticky zapne. Na výběr je jas 50 nebo 100 % o dvou náhradních teplotách chromatičnosti, teplá bílá v rozmezí 3000 až 3500 K a studená bílá v rozmezí 6000 až 6500 K. Světelný tok při plném jasu je 140 lm s příkonem 2 W [22].

Pomocí bezdrátové komunikace Bluetooth lze svítidla ovládat aplikací Immax Neo, ke které je přístup i přes hlasové asistenty Google Assistant, Amazon Alexa s Apple Siri. Součástí je také dálkový ovladač. Svítidlo splňuje třídu ochrany IP54 [22].

Svítidlo je vybaveno solárním panelem, typu monokrystalický křemíkový, o výstupním napětí 5,5 V, výkonu 3,7 W a průměru 23 cm. Energii ukládá do baterií typu 18650 o výstupním napětí 3,7 V a kapacitě 4000 mAh. Doba nabíjení je až 5 hodin a doba provozu až 12 hodin [23].



Obrázek 19: Venkovní solární svítidlo Immax Neo Lite Bubbles [22]

2.5.3 Přenosné solární svítidlo Mpowerd Luci Connect

Toto přenosné svítidlo je prvním inteligentním svítidlem firmy Mpowerd a je určeno k turistice a venkovnímu stolování. Díky závěsnému uchu a ploché podstavě svítidlo lze umístit do mnohých pozic. Je nafukovací konstrukce právě kvůli záměru přenášení. Dosahuje světelného toku 250 lm a splňuje třídu ochrany IP67. Světelné scény lze ovládat tlačítky nebo přes aplikaci podporovanou systémy Android a iOS. V aplikaci nalezneme předdefinované barevné scény, které lze upravit. Dále v aplikaci lze nastavit časovač vypnutí, nastavit jas, zkontrolovat stav baterie, zapínat a vypínat svítidlo a propojit a ovládat více svítidel najednou. Doba svícení je udávána až 24 hodin v závislosti na použitém jasu, doba nabíjení 14 hodin solárním panelem a 3 hodiny přes USB z napájecí sítě. Ve složeném tvaru má svítidlo výšku 3,5 cm, v rozloženém pak 10,8 cm s průměrem 12,7 cm. Zařízení lze použít jako powerbanku [24].



Obrázek 20: Přenosné solární svítidlo Mpowerd Luci Connect [25]

2.5.4 Přenosné svítidlo EcoFlow Camping Light

Přenosné svítidlo je dalším produktem určeným k turistice a venkovnímu stolování. Je vybaveno dvěma závěsnými uchy a dvěma magnety ve spodní části pro širokou škálu použití. Na stranách svítidla jsou dva žlaby pro lepší úchop a zabránění kutálení. Splňuje třídu ochrany IP 65. Nabíjení je pomocí USB z napájecí sítě a může být použito jako powerbanka. Ze spodní strany je pětistupňový indikátor stavu nabití, který indikuje stav nabíjení blikáním, a také tlačítko, kterým lze svítidlo zapnout a vypnout, měnit odstín bílého světla od teplé bílé, přes neutrální bílou až po studenou bílou. Podržetím tlačítka lze snižovat jas světla. Dále svítidlo nabízí funkci baterky a blikání. Kapacita vestavěné baterie je 7200 mAh, což odpovídá době provozu až 168 hodin při nejnižším jasu, při plném jasu 11 hodin. Světelný tok je 400 lm [26].



Obrázek 21: Přenosné svítidlo EcoFlow Camping Light [26]

3. INTEGRATIVNÍ OSVĚTLENÍ

3.1 Lidský zrakový systém

Zrak je jedním za základních lidských smyslů, který poskytuje okolo 80 % informací o prostředí, ve kterém se nacházíme. Nositeli těchto informací jsou světelné a barevné podněty. Vidění zahrnuje příjem informace, její výběr a její zpracování. Optické podněty jsou transformovány v nervové vzruchy vedené zrakovým nervem k mozgovým centrům vidění, kde vzniká zrakový počitek. Zrakový systém se skládá ze tří základních částí. Periferní části jsou oči. Spojovací segment je tvořen zrakovými nervy. Centrální oblast se skládá z podkorové a korové části mozku [2].

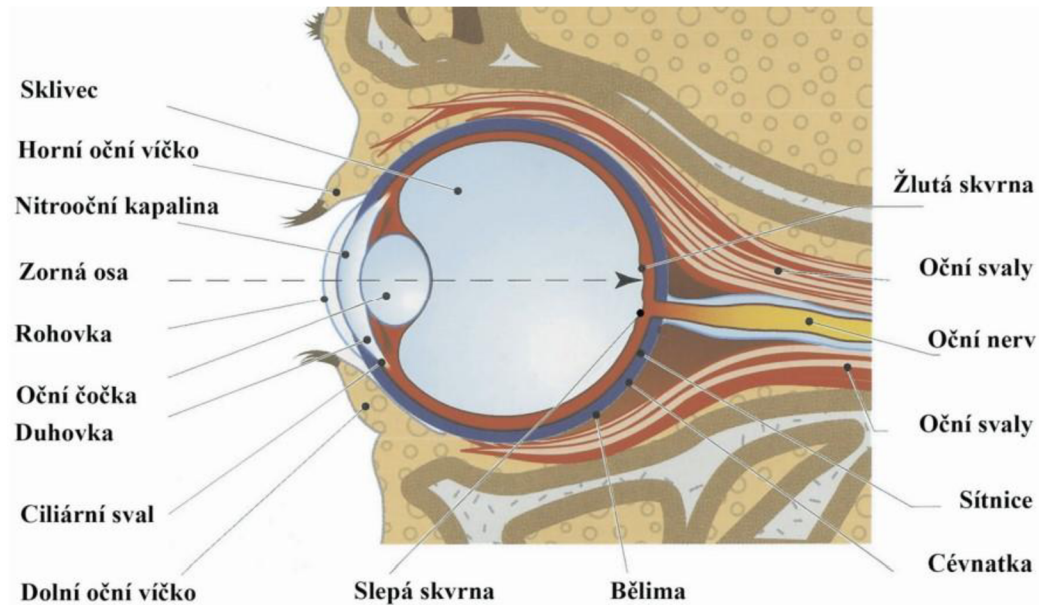
Oko je smyslový orgán přijímající informace o vnějším prostředí přenášené světlem. V oku se tato informace upravuje v nervová podráždění a částečně se zpracovává. Oči jsou symetricky uloženy v lebce v očníchích. Tvar oční bulvy je téměř kulový kvůli snadnému otáčení v ocnici. U dospělého člověka dosahuje přibližně průměru 24 mm. Oko je schopno se přizpůsobit osvětleností přibližně od 0,25 lx do 10^5 lx. Stěnu oka v zadní části tvoří tři vrstvy. Bělíma je neprůhledná tkáň opálově bílé barvy. Cévnatka je tvořena krevními cévami a vlasečnicemi. Je oddělena tenkou elastickou blánou od sítnice, přes níž je cévnatka sítnicí vyživována. V přední části oka přechází bělíma v průhledný pevný obal zvaný rohovka. Cévnatka přechází v řasnaté tělísko, na němž je zavěšena oční čočka, a na duhovku. Mezi rohovkou a duhovkou je prostor zvaný přední komora, vyplněný nitrooční tekutinou. Duhovka tvoří clonu oka. Uprostřed duhovky je přibližně kruhový otvor, tzv. zornice, přes níž vstupuje do oka světlo. Průměr zorničky se mění smršťováním a uvolňováním hladkých svalů duhovky přibližně od 1,8 mm do 7,5 mm. Tím se reguluje množství světla vstupujícího do oční bulvy [2].

Vnitřní prostor oka vyplňuje bezbarvá bezbuněčná rosolovitá hmota zvaná sklivec. V zadní části oční bulvy vystupuje oční nerv spojující sítnici s vyššími zrakovými nervovými centry v mozku. V tomto místě nejsou nervové buňky ani fotoreceptory – tzv. slepá skvrna. Uprostřed sítnice je žlutá skvrna, v jejíž prohloubené střední části se nachází centrální jamka, o průměru přibližně 1,5 mm, s nejvyšší ostroží zraku [2].

Zjednodušeně lze říci, že má oko nervový a optický systém. Optická část zahrnuje rohovku, přední komoru s nitrooční tekutinou, duhovku se zorničkou, čočku a sklivec. Umožňuje vytvářet na sítnici převrácený a zmenšený obraz vnějšího prostředí [2].

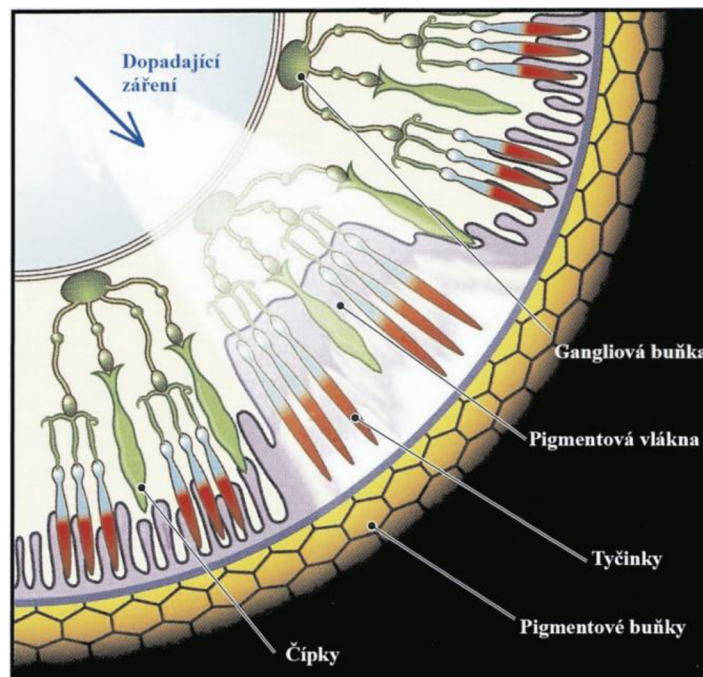
K nervovému systému oka patří nervové zásobení a zejména sítnice. Sítnice je tenká blána, s tloušťkou přibližně 0,2 mm, s velmi složitou pravidelnou buněčnou skladbou. Sítnice je členěna do jedenácti vrstev, v nichž je vedle fotoreceptorů rozmístěno mnoho dalších nervových buněk, např. gangliových buněk. V sítnici probíhá první zpracování a třídění informací zachycených fotoreceptory v podobě prostorových, časových, jasových a barevných rozdílů. Vybrané informace jsou transformovány do podoby schopné

přenosu vlákniny zrakového nervu do vyšších úrovní zrakového systému a do mozkových center [2].



Obrázek 22: Lidský zrakový orgán [2]

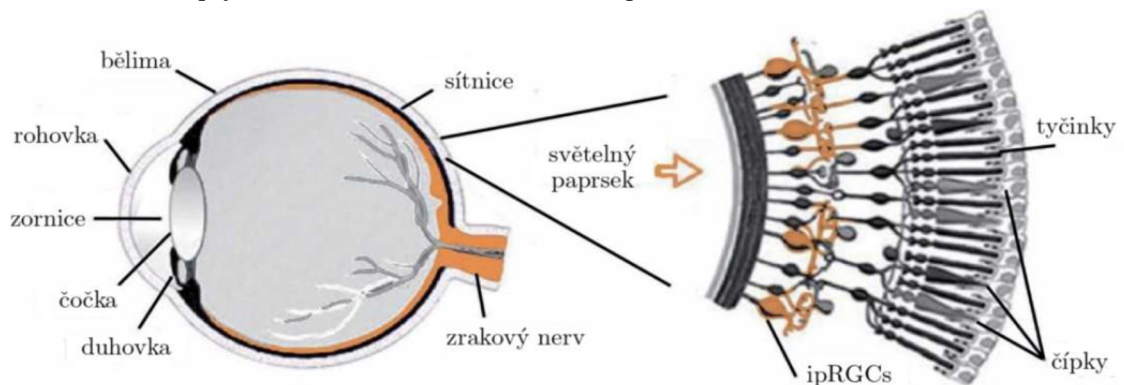
Základní fotoreceptory jsou oční čípky, které se podílejí převážně při denním vidění. Dále oční tyčinky, které se uplatňují převážně při nočním vidění. V sítnici je přibližně 6,5 milionů čípků a asi 125 milionů tyčinek, které jsou umístěny hustěji ke kraji sítnice. Centrální jamka obsahuje pouze oční čípky. Třetím druhem fotoreceptorů jsou tzv. cirkadiánní čidla, a jsou součástí gangliových buněk, zajišťujících cirkadiánní cyklus [2].



Obrázek 23: Základní zobrazení sítnice [2]

3.2 Vizuální a nevizuální systém

Během posledních tří desetiletí byl potvrzen vliv světla na fyziologické a psychologické procesy v lidském těle. Byl prokázán vliv světelného prostředí na chování člověka, bdělost, náladu a pracovní výkon. Takovýto způsob vnímání světla nevytváří vizuální obraz v mozku. Poskytuje pouze informaci o přítomnosti či nepřítomnosti světla v okolí. Dříve se tohle vnímání světla přisuzovalo očním tyčinkám a čípkům. Pozdější pokusy na lidech i zvířatech trpících ztrátou zraku toto tvrzení vyvrátily. Roku 1998 byl v sítnici oka savců objeven a popsán retinální protein citlivý na světlo jménem melanopsin. Melanopsin se vyskytuje odděleně od struktury známých fotoreceptorů. Funkčně nezávislé buňky s melanopsinem se označují jako *vnitřně fotosenzitivní sítnicové gangliové buňky* (ipRGCs). Ve vrstvě gangliových buněk tvoří ipRGCs rovnoměrně rozptýlenou fotosenzitivní síť téměř po celé sítnici [27].



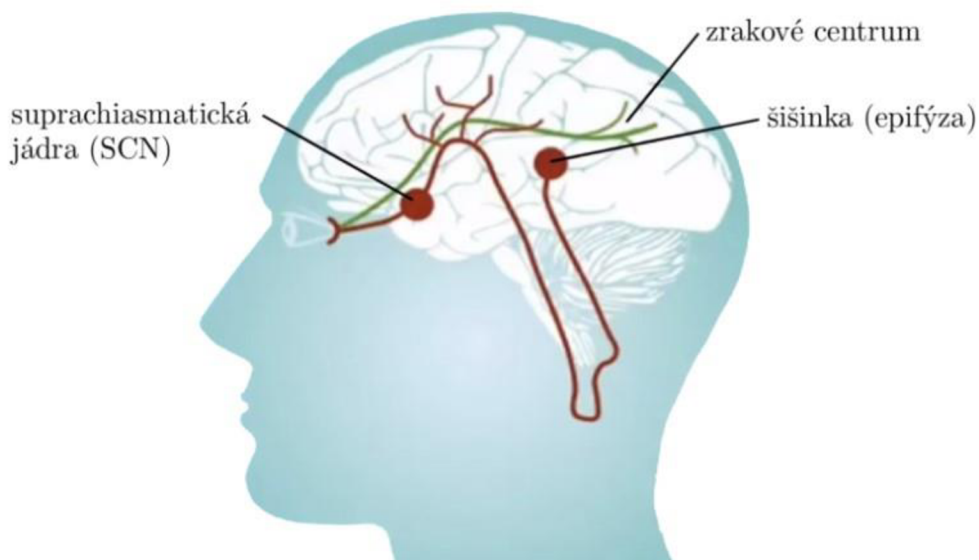
Obrázek 24: Lidské oko s detailním zobrazením sítnice [27]

Ve světločivných buňkách v sítnici dochází vlivem složitých biochemických reakcí ke vzniku nervového vzruchu, který je zrakovými nervy přenesen do zrakového centra v mozku nebo do epifyzy. Podlé té části mozku, do které zrakový nervový vzruch proudí, dělíme vnímání světla na vizuální a nevizuální. Vizuálním systémem se chápe obrazové vidění a vše s ním spojené. Nevizuálním systémem se pak chápou všechny ostatní procesy v lidském těle [28].

Human Centric lighting je část světelné techniky, která se zabývá světlem dopadajícím na sítnici a jeho procesy vyvolané v lidském těle. Jejím podoborem je nevizuální systém vnímání světla, to jsou ty účinky světla, které nezajišťují vidění ani zrakový vjem. Buňky ipRGCs tvoří malou část celkového počtu gangliových buněk, a to 1 až 5 % dle druhu a metody hodnocení. V sítnici se nachází minimálně pět typů buněk ipRGCs lišících se stavbou a propojením s očními tyčinkami a čípkami. Dále se liší obsahem proteinu melanopsinu a vnitřní fotosenzitivitou. Z buněk ipRGCs putuje nervový vzruch zrakovým nervem do malých shluků nervových buněk, tzv. suprachiasmatických jader. SCN se nachází v místech zrakových nervů vedoucích z oka do mozku, obecně se jim přezdívá biologické hodiny. Jádra jsou složena z několika tisíců buněk. Každá z těchto buněk může vysílat elektrický signál. Nejdůležitější z těchto signálů jsou vysílány

do mozkové epifýzy. Epifýza zajišťuje tvorbu důležitých hormonů, jako je melatonin, serotonin a kortizol, které mají vliv na naše chování a psychickou pohodu [29].

Na Obrázek 25 je zelenou barvou zobrazena nervová dráha ze sítnice do zrakového centra (vizuální systém). Červenou barvou je zobrazena nervová dráha nevizuálního systému vnímání světla.



Obrázek 25: Vizuelní a nevizuelní systém vnímání světla [29]

Vystavení oka světlu ve večerních hodinách, tj. přelom večera a subjektivní noci, vede obecně ke zpoždění fáze cirkadiálních rytmů. Vystavení lidského oka v druhé polovině subjektivní noci naopak způsobí předběhnutí fáze cirkadiálních rytmů. V nočních hodinách může vyvolat osvětlenost 100 lx reakci nevizuelního systému o síle 50 % maximální odezvy. Pro lidský organismus je snazší se vyrovnat se zpožděním cyklu, než s jeho předběhnutím [30].

3.2.1 Melatonin

Hlavní funkcí spánkového hormonu melatoninu je regulace cirkadiálního cyklu. U všech živých organismů se melatonin tvoří výhradně v noci. Obvykle ve večerních hodinách se dostavuje únava a v epifýze se začne tvořit melatonin. Melatonin proudí do krve, postupně se roztahují cévy končetin, tzn. větší únik tepla do okolí a s tím spojený pokles tělesné teploty. Je to příprava k regeneraci. Kvalita spánku závisí na hladině melatoninu v krvi. S nástupem dne klesá tvorba melatoninu a vzrůstá tělesná teplota. Melatonin se začíná přeměňovat na serotonin. Hladiny serotoninu a kortizolu vzrůstají a udržují tělo aktivní přes den. Ve večerních hodinách se tento cyklus začíná opakovat v závislosti na světle dopadajícím na sítnici. Produkce melatoninu je nejvyšší u kojenců, přibližně od patnáctého roku produkce začne klesat. Okolo padesátého roku je asi šestinou původní hodnoty. Hladinu melatoninu v těle lze zvýšit přirozeným slunečním zářením ve dne a úplnou tmou v noci [30].

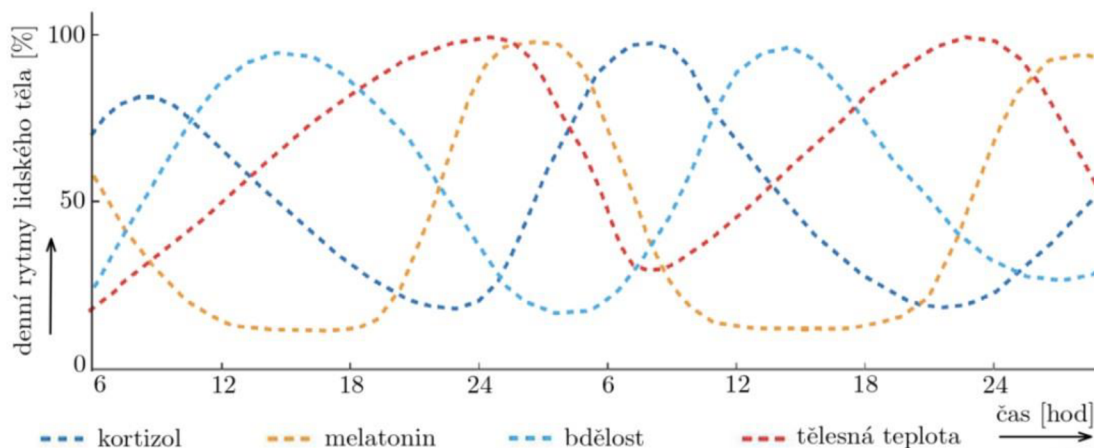
Melatonin má spoustu pozitivních účinků na lidský organismus. Zrychluje srdeční činnost, zvyšuje kvalitu spánku – odstraňuje většinu případů nespavosti, zpomaluje přirozený proces stárnutí, podporuje imunitu, působí jako antioxidant, omezuje vznik šedého zákalu, snižuje cholesterol a zvýšený krevní tlak, a také omezuje negativní projevy chemoterapie při léčbě rakoviny [30].

3.2.2 Serotonin

Serotonin je označován jako hormon dobré nálady. Podporuje pozitivní myšlení a pocit sytosti. Při nízké hladině serotoninu nastupuje stres, deprese, úzkosti, mohou se vyskytovat problémy s pamětí a trávicí problémy. Serotonin dále ovlivňuje srážlivost krve, což při jeho nedostatečné hladině v těle může být příčinou vzniku migrén. V závislosti na přijímaném světle se jeho nedostatek může projevit hlavně v zimních měsících, kdy je obvykle nedostatek slunečního světla [30].

3.2.3 Kortizol

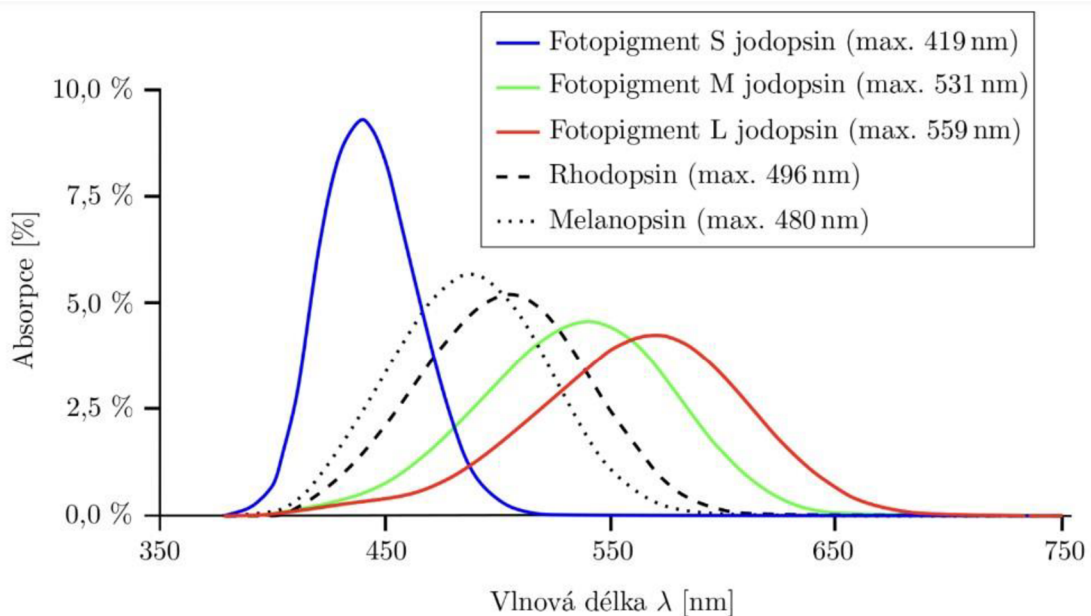
Kortizol je jedním ze základních hormonů stresu. Dává organismu podnět k probuzení a aktivitě. Po probuzení je hladina kortizolu v těle zvýšená, na normální hladinu klesá během dvou hodin a výrazně klesá ve večerních hodinách. Nejnižší koncentrace dosahuje kortizol kolem půlnoci. Zvyšuje obsah cukru v krvi pro získání energie a posílení imunitního systému. Jeho nízká hladina může vést k obezitě, depresi, oslabení imunity, poškození paměti a dalším nepříznivým vlivům pro lidský organismus. Naopak vysoká hladina vede ke zvýšení krevního tlaku, zvýšení hladiny cukru v krvi, mohou se tvořit častěji záněty a překyseluje žaludek. Krom dostatečného přísunu světla lze správnou hladinu kortizolu v těle podpořit přísunem vitamínu C, ženšenu, hořčiku a snahou vyhýbat se stresovým situacím [30].



Obrázek 26: Průběh hladin melatoninu a kortizolu v lidském těle [30]

3.2.4 Opsiny

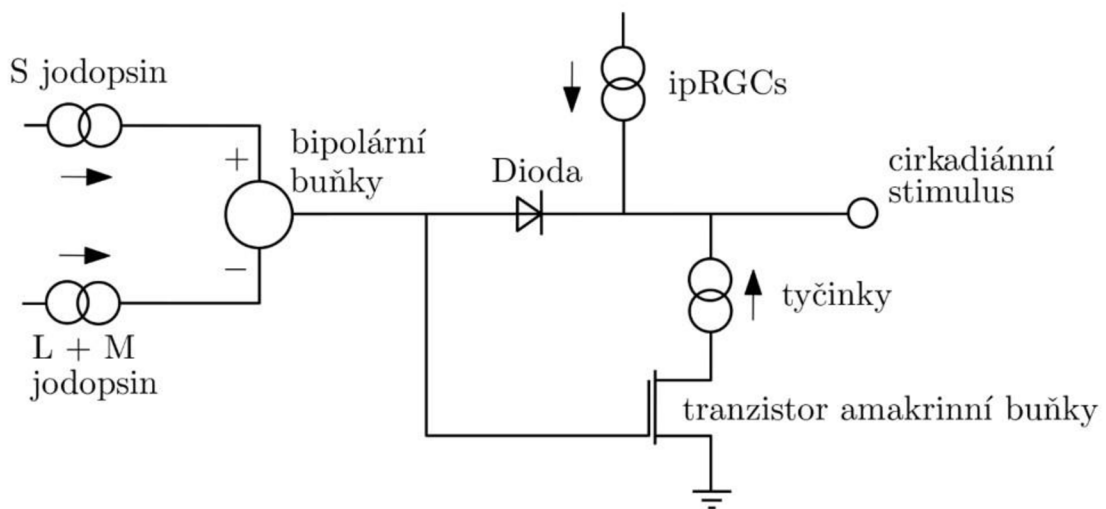
Sítnice lidského oka obsahuje pět fotopigmentů přijímajících světelné záření. První tři jsou obsaženy v očních čípcích a nazývají se jodopsiny typu S, M a L pro barevné vidění. V očních tyčinkách se nachází čtvrtý fotopigment rhodopsin. Rhodopsin absorbuje energii celého viditelného spektrálního složení zdroje. Uplatňuje se při nočním vidění, neslouží tedy k rozpoznání barev. Maximální citlivosti dosahuje při vlnové délce 507 nm. Posledním fotoreceptorem je melanopsin, obsažený v buňkách ipRGCs. Je mnohem méně citlivý než ostatní opsiny, k aktivaci tedy potřebuje více světelných paprsků než oční tyčinky a čípky. Také pravděpodobnost dopadu fotonu na ipRGCs je pro sledovanou plochu sítnice více než milionkrát menší nežli u tyčinek a čípků. Maximální citlivosti dosahuje při vlnové délce 480 nm. Na Obrázek 27 je zobrazena spektrální citlivost opsinů pro lidské oko. Všechny spektrální křivky jsou normalizovány se stejnou integrační plochou [31].



Obrázek 27: Absorpční spektrum fotoreceptorů oční sítnice [31]

Melanopsin v ipRGCs je označován jako primární čidlo pro cirkadiánní rytmus těla. Oční tyčinky a čípky se však na cirkadiánním rytmu podílejí také. Pokusem bylo zjištěno, že při odstranění melanopsinu a očních tyčinek z oka laboratorní myši kompenzují ztrátu zbylé fotopigmenty. Bylo zachováno částečné řízení cirkadiánního rytmu zvířete, tedy předávání informace o přijatém světle do SCN. Při odstranění veškerých fotopigmentů z oka došlo ke ztrátě vizuálního i nevizuálního vnímání světla myši. Oko hlodavce lze v omezené míře srovnávat s lidským okem. Množství světla potřebné k aktivaci cirkadiánních rytmů u hlodavců je desetkrát až stokrát menší než u lidí, stejně jako celková doba osvětlování sítnice oka. To dokazuje propojení očních tyčinek a čípků s ipRGCs, přestože nemohou být přímo propojeny [31].

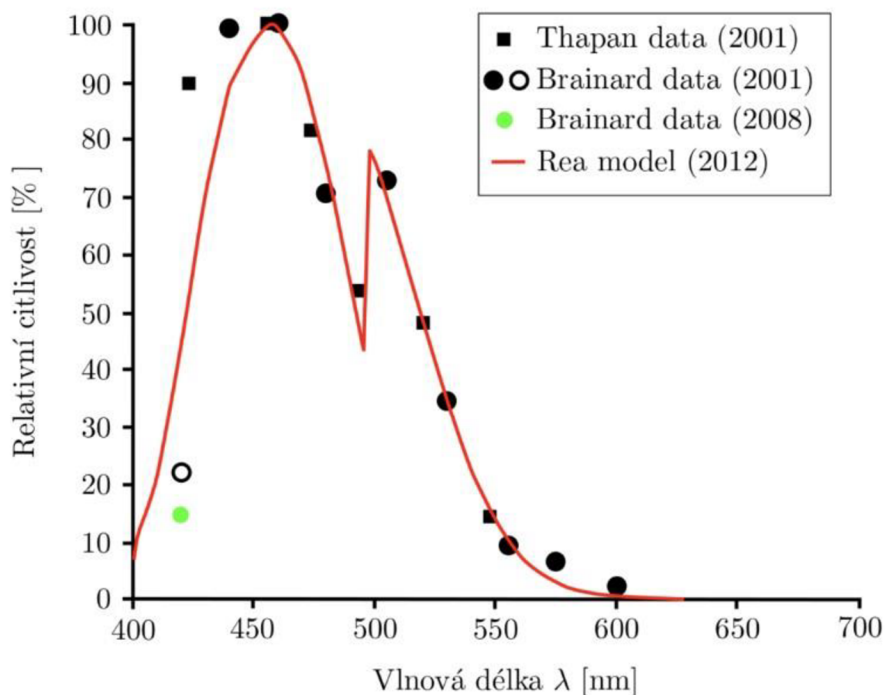
Dle výzkumů popsaných v [31] modeloval profesor Mark Rea křivku citlivosti cirkadiálního cyklu člověka i s ohledem na přispívání očních tyčinek a čípků k řízení cirkadiálního rytmu. Potvrdil propojení všech fotoreceptorů přes bipolární a amakrinní buňky. Z čípků má největší podíl na řízení jodopsin typu S, který je nejpodobnější ipRGCs v hustotě rozložení buněk po sítnici. Oproti jodopsinům typu M a L zabírá pět až deset procent populace všech čípků a není obsažen v centrální jamce oka. Centrální jamka je fotopická oblast sítnice ležící na optické ose oka. Obsahuje pouze jodopsiny typu M a L. Reův nelineární model byl vytvořen pro monochromatický i polychromatický světelný zdroj. Na základě Obrázek 28 je dle matematických vzorců popsaných v [31] sestrojena nelineární křivka citlivosti cirkadiálního systému. Dioda je ve schématu umístěna za účelem možnosti úpravy schématu podle budoucího zkoumání cirkadiálního systému, a také udává propustnost signálu. Tyčinky představují nastavení mezní hranice množství světla a spektrálního složení zdroje, které v kombinaci mohou započít cirkadiální aktivitu. Předpokládá se, že tato komunikace probíhá prostřednictvím amakrinních buněk. Oční čípky komunikují s ipRGCs přes bipolární buňky a zároveň ovlivňují zapojení tyčinek do procesu řízení cirkadiální aktivity. Čípky mohou vysláním signálu přerušit jednosměrnou větev propojení tyčinek s ipRGCs na tranzistoru s amakrinními buňkami. Zabrání tak zapojení tyčinek do cirkadiálního stimulu. Na Obrázek 29 se toto přerušení projeví při vlnové délce 507 nm [31].



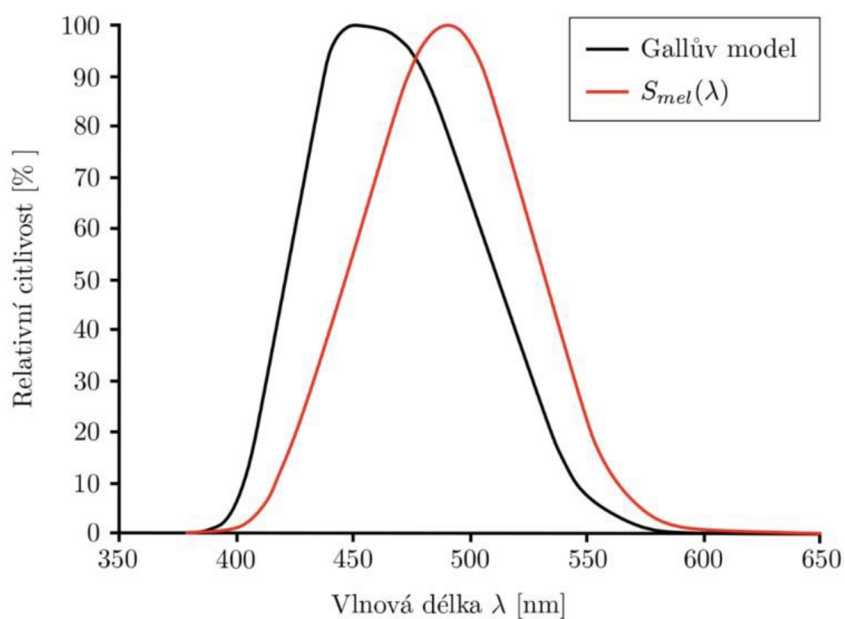
Obrázek 28: Schéma propojení jednotlivých fotopigmentů oka [31]

Dalším modelem je lineární model, tzv. $s_{mel}(\lambda)$, s maximální citlivostí při vlnové délce 480 nm. Stejně jako v modelu Marka Rea je uvažován vliv očních tyčinek a čípků k cirkadiální aktivitě. Dále je zohledněna změna propustnosti zornice v závislosti na věku člověka. Během stárnutí člověka oční čočka žloutne, to vede ke snížení propustnosti světla přibližně o deset procent každých deset let. Křivka lineárního modelu je vztažena ke standartnímu pozorovateli věku 32 let. Koeficient propustnosti zornice je rovný 1 [31].

Na Obrázek 30 je zobrazen lineární model citlivosti, pro porovnání s matematickým modelem Dietricha Galla vycházejícího z naměřených dat Brainarda a Tapanu. Z lineárního modelu je popsána metoda výpočtu a hodnocení vlivu světla na člověka pomocí tzv. α -opic osvětlení [31].



Obrázek 29: Citlivost cirkadiálního systému [31]



Obrázek 30: Spektrální citlivost cirkadiálního systému lineárního modelu [31]

3.2.5 Metoda výpočtu hodnocení světla na člověka

Metoda α -osvětlení je uznávána Mezinárodní komisí pro osvětlování (CIE) a předpokládá se její zahrnutí do normativních dokumentů. V červnu 2019 byl vydán postup pro výpočet jednotek α -opic lux pomocí metody α -osvětlení. Dále CIE potvrdila soulad jednotky α -opic lux s Mezinárodním systémem jednotek SI. Míra osvětlenosti daného fotoreceptoru se určí jako

$$E_{\alpha} = K_N \int E_{e,\lambda} \cdot N_{\alpha}(\lambda) d\lambda, \quad (3.1)$$

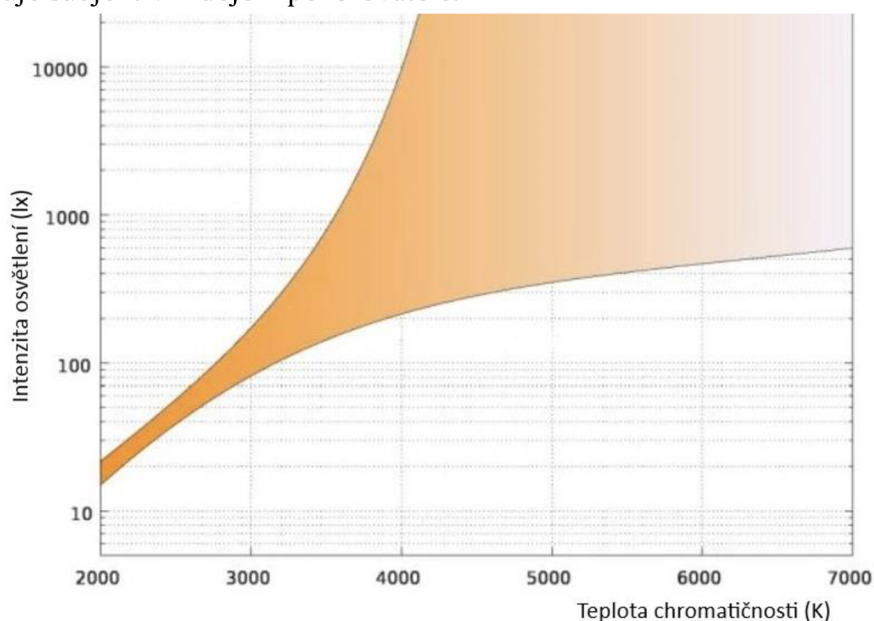
kde E_{α} je osvětlení daného typu fotoreceptoru, K_N je konstanta rovna $72\,983,25 \alpha\text{-lm} \cdot \text{W}^{-1}$, $E_{e,\lambda}$ je celkové ozáření ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) a $N_{\alpha}(\lambda)$ je spektrální citlivost daného fotoreceptoru. Konstanta K_N byla určena dle vztahu [32], [33]

$$K_N = \int K(\lambda) d\lambda. \quad (3.2)$$

Rovnice (3.2) prokazuje vztah výsledné hodnoty osvětlení E_{α} a světelných účinků záření $K(\lambda)$, a zároveň světelné účinnosti záření $V(\lambda)$ [33].

3.2.6 Kruithofův diagram

Kruithofův diagram vyznačuje zrakově pohodlnou teplotu chromatičnosti světla při jisté intenzitě osvětlení. Nad barevnou křivkou je oblast, kde se může barva předmětů zdát více červená vlivem přesvětlení. Naopak pod barevnou křivkou se mohou předměty zdát více do modra dojemem nedostatku světla. Přes den je vhodné volit vyšší osvětlenost a chladnější tóny bílého světla, ve večerních hodinách je tomu naopak. Diagram nezohledňuje subjektivní dojem pozorovatele.

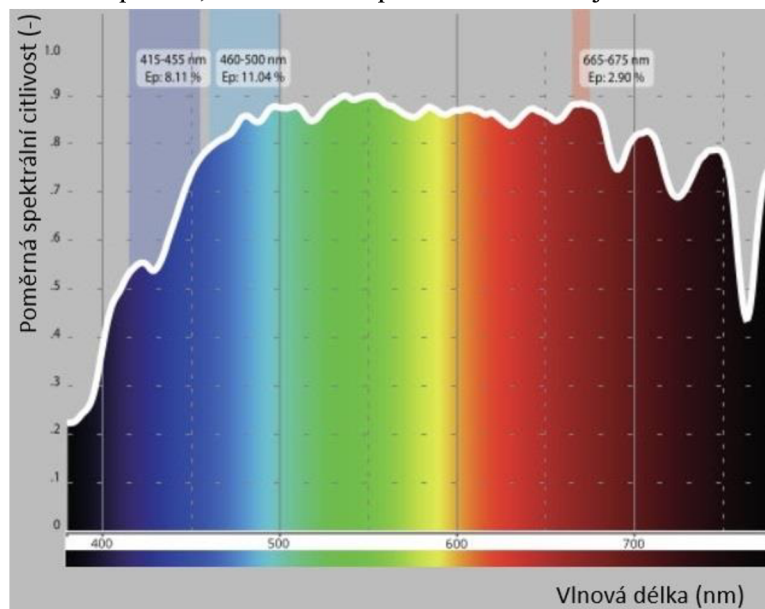


Obrázek 31: Kruithofův diagram [34]

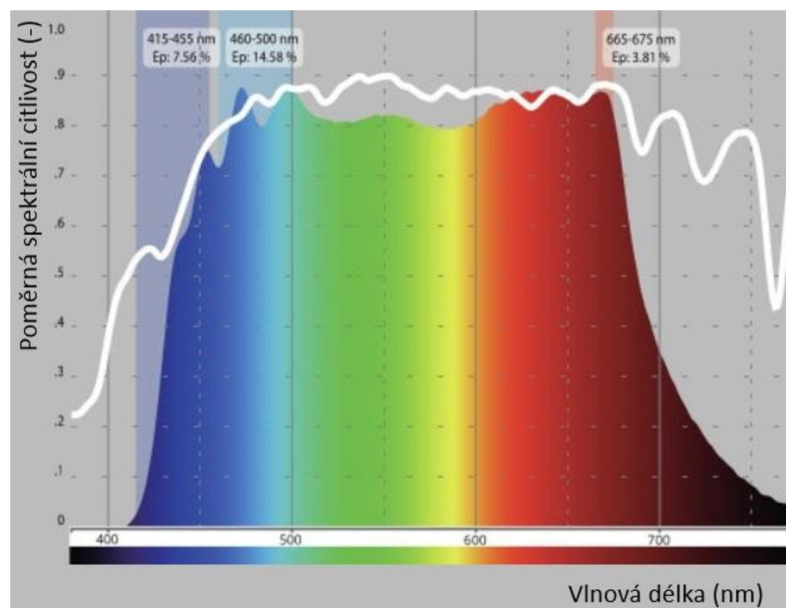
3.3 Plnospektrální osvětlení

Schopnost ovládat oheň byla krokem vpřed ve vývoji lidstva. Oheň se začal používat jako tepelný zdroj, ochrana před dravou zvěří, nový způsob úpravy jídla, nástroj k výrobě pokročilejších loveckých nástrojů a v neposlední řadě jako zdroj světla. Můžeme ho tedy označit za jakýsi prvopočátek světelné techniky. Oheň se později začal využívat ve formě loučí a svíček. Dalším, sofistikovanějším nástrojem, byla olejová lampa a později plynová lampa. S objevem elektrické energie byla vynalezena oblouková lampa a všeobecně známá žárovka s wolframovým vláknem, kterou lze označit za revoluční objev. Klasická žárovka byla zdokonalena na halogenovou žárovku. Následoval vývoj různých typů výbojek, obecně označovaných jako směsové výbojky, kompaktních zářivek až po LED světelné zdroje, které používáme dnes. Mnohé konvenční světelné zdroje nedosahují kvalitního spektrálního složení pro řízení lidských cirkadiánních rytmů, proto je v posledním desetiletí věnována pozornost vývoji plnospektrálních osvětlení, které se současně téměř blíží k ideálním podmínkám, tzn. spektrálnímu složení slunečního záření.

Jednou z nabízených technologií je technologie Spectrasol, která má celkově vyrovnané spektrální složení, náhradní teplota chromatičnosti odpovídá barvě světla za jasného dne a dále svítidla distribuují světlo plošně nebo nepřímě o strop, a vytváří tak dojem jasného nebe. Tato technologie nabízí optimalizované, cirkadiánně účinné integrativní osvětlení, které působí na vizuální i nevizuální systém oka. Je vhodným osvětlením pro duševní nebo fyzické aktivity uvnitř budov [35]. Na Obrázek 32 je znázorněno spektrální složení slunečního záření s vyznačenými oblastmi, s procentuálním zastoupením, na které se Spectrasol zaměřuje ze zdravotního hlediska.



Obrázek 32: Spektrální křivka poledního slunečního záření [36]



Obrázek 33: Spektrální křivka Spectrasol [36]

Na Obrázek 33 je spektrální složení technologie Spectrasol, které cíleně neobsahuje koncentrovanou energii v oblasti škodlivého modrého světla, představující při dlouhodobých absorpcích riziko degenerace sítnice oka, nezáležící na intenzitě. Ve sledovaném pásmu červené barvy je kompenzační faktor s preventivními i terapeutickými účinky. V rozmezí mezi 450 až 670 nm má oproti mnohým konvenčním zářivkám a LED světelným zdrojům vyvážené zastoupení vlnových délek. Spektrum se shoduje z 97 % se slunečním. U Spectrasolu je potlačen flickr. Svítidla a světelné zdroje dosahují indexu podání barev nad 95 s náhradní teplotou chromatičnosti okolo 4700 K. Maximální odchylka pro plnospektrální zdroje umělého světla se uvažuje $\pm 10\%$ [35]. Díky plnému vyzařování v azurové oblasti, tj. 460 až 500 nm, podporuje prokognitivní světlo zdraví, celkovou vitalitu a kognitivní systém mozku, např. koncentraci, myšlení, paměťové funkce a bdělost [36].

3.4 Biodynamické osvětlení

Přívlastek biodynamický je složen z řeckých slov bios, tj. život, a dynamis, tj. proměnlivost, síla a potenciál. Biodynamické světlo napodobuje denní světlo s působením vnějších sil na živé organismy. Proměnlivost denního světla je dána oběhem Země kolem Slunce, její rotací kolem nakloněné osy a průchodem atmosférou. Světlo se při průchodu atmosférou částečně rozptyluje, po dopadu na sítnici se rozptýlená a přímá složka skládají v závislosti na okolních podmínkách. Fialové světlo se rozptyluje 16krát více než červené. Intenzita osvětlení letního jasného dne může být okolo 100 000 lx. U umělého záření se běžně setkáváme s hodnotami o dva až tři řády nižší. Integrativní osvětlení je možno pomocí řídicí jednotky ovládat tak, aby v průběhu dne upravovala intenzitu osvětlení a náhradní teplotu chromatičnosti [37].

„Algoritmus vypočítá teoretickou vodorovnou venkovní osvětlenost pro aktuální čas a datum, dále může vzít v úvahu geometrické uspořádání a orientaci prostor, pracovní dobu uživatelů, nastavení ovládacích prvků a senzorů nebo přidat proměnlivou složku z generátoru pseudonáhodných čísel (simulace mraků). Požadavek na vypočtenou intenzitu následně odešle do sítě svítidel. Řídicí jednotka může ovládat rovněž teplotu chromatičnosti – pokud to svítidla umožňují. U zářivek je teplota chromatičnosti pevně daná složením luminoforu a řízení T_c je možné jen rozsvícením zdrojů s jinou teplotou chromatičnosti.“ U LED je několik způsobů, jak lze docílit změny barvy světla. Je možné použít svítidlo s více zdroji různé teploty chromatičnosti, nebo u RGBW a RGBA (A-Amber) lze barvu téměř libovolně namíchat. *„Umělé osvětlení může rovněž imitovat zdánlivý pohyb slunce po obloze. Natáčením částí svítidel nebo jejich optických komponentů lze světlo směřovat pod potřebnými úhly. Rovněž je možné použít doplňková svítidla umístěná na stěnách nebo jako součást interiéru. Ta mohou mít oproti stropním svítidlům nižší světelný tok, ale i nižší teplotu chromatičnosti, protože je řídicí systém aktivuje až v době, kdy je slunce nízko nad obzorem (méně intenzivní a teplejší světlo). Poslouží jak při simulaci skutečného dne na obloze, tak i při programu „prodloužený den“ v kanceláři, kde biodynamické osvětlení může plnit funkci světelných hodin, které uživateli naznačí, že se blíží čas odpočinku [37].“*

Toto osvětlení se používá k optimalizaci pracovního prostředí, ve zdravotních zařízeních k podpoře rychlejšího zotavení pacientů, nebo v domácím prostředí pro každodenní aktivity a relaxaci. *„Cílem biodynamického osvětlení je vytvářet prostředí, které podporuje lidské zdraví a pohodu tím, že respektuje přirozené biologické rytmy a individuální potřeby. Používá se ve zdravotnictví, v kancelářských prostorách, školách a dalších budovách, kde je důležitá kvalita osvětlení a jeho vliv na člověka [38].“*

3.4.1 Vitae

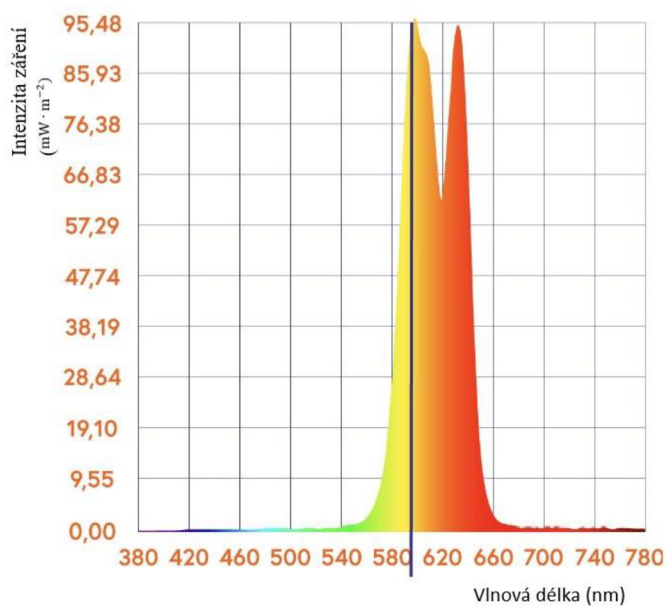
Vitae je vyráběno ve dvou verzích, a to EEN (evening-evening-night) a DEN (day-evening-night), které se liší především náhradní teplotou chromatičnosti a světelným tokem. *Oranžová fáze* Vitae neobsahuje vlnové délky kratší než 550 nm, které večer zpomalují vylučování melatoninu. Oranžovou fází je doporučeno používat nejméně 9,5 hodiny před ranním vstáváním, protože melatonin se začíná vylučovat po devadesáti minutách od posledního dopadu vlnových délek pod 550 nm na sítnici oka. V *teple bílé fázi*, určené k relaxaci, má snížený obsah modré složky a napodobuje světlo slunce před západem. *Jasně bílá fáze* má rovnoměrné spektrum s vyrovnaným podílem modré i červené složky. Vitae je opatřeno závitem E 27, je určeno do lokálních lamp [39].

Teple bílá fáze má index podání barev 97 a jasně bílá fáze 96. U většiny konvenčních LED světelných zdrojů je tato hodnota stále okolo 80. Stejně jako Spectrasol má potlačený flickr. Režim svícení je ovládán počtem sepnutí vypínače. Vitae není záměrně možné ovládat pomocí aplikace, kvůli používání v noci. Po prvním sepnutí, které je déle

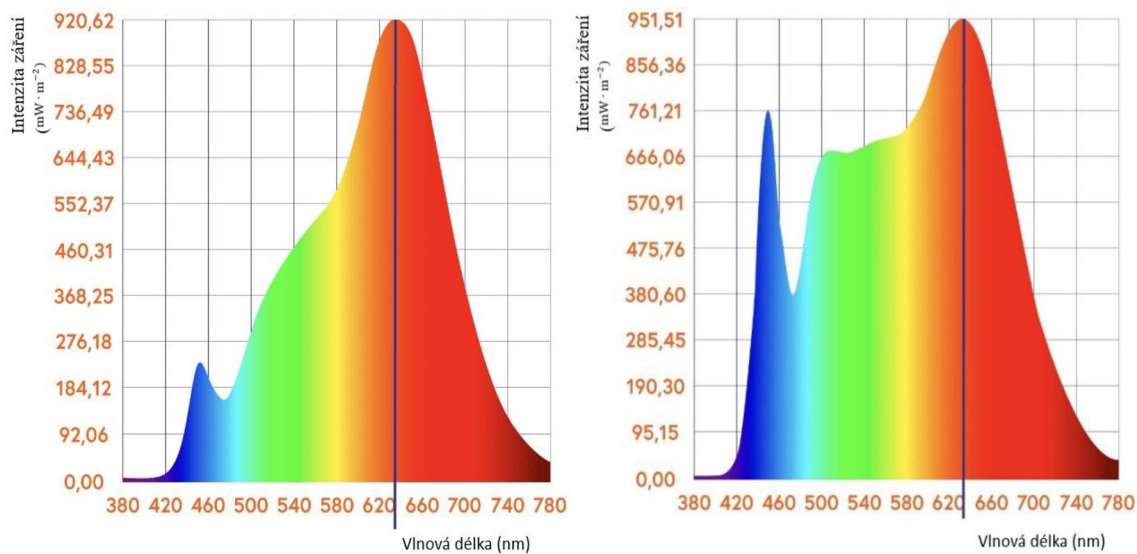
než 11 sekund, se rozsvítí vždy do oranžové fáze. Pokud tedy chceme zvolit jeden z bílých režimů, musíme spínání opakovat v čase do 11 sekund od předchozího sepnutí [39].

Tabulka 8: Technické parametry žárovky Vitae DEN [39]

	Oranžová	Teplá bílá	Studená bílá
P_1 [kWh]	2	6	7
T_c [K]	x	2 800	4 000
R_a [-]	x	> 96	> 96
Φ [lm]	10	300	440



Obrázek 34: Spektrum oranžové fáze Vitae [39]



Obrázek 35: Spektrum teple bílé a jasně bílé barvy světla (zleva) [39]

4. NAPÁJENÍ SOLÁRNÍCH SVÍTIDEL

Obnovitelné zdroje elektrické energie jsou jedním z hlavních témat budoucnosti energetiky. V rámci trvale udržitelného rozvoje považujeme energii slunečního záření za jednu z nejčistších a nejdostupnějších zdrojů energie na Zemi. Elektrická energie získaná přímou přeměnou slunečního záření byla objevena v 19. století francouzským fyzikem Becquerelem. Fotoelektrický jev poté teoreticky popsal Albert Einstein ve 20. století [40].

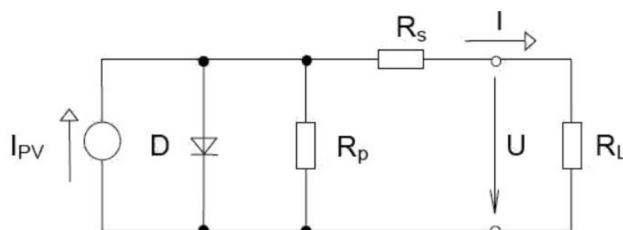
4.1 Fotovoltaické panely

Fotovoltaické panely jsou složeny z fotovoltaických článků podle požadavků na výstupní napětí a proud, ty určují výsledné sérioparalelní zapojení. Při fotoelektrickém jevu jsou elektrony uvolňovány z látky v důsledku absorpce elektromagnetického záření látkou. Absorpce je způsobena interakcí světelných fotonů s částicemi hmoty (elektrony a jádery). Při této interakci mohou nastat tři případy, z nichž důležitým případem je interakce s vázanými elektrony, kdy může dojít k uvolnění elektronu z vazby [40].

Hlavním požadavkem fotovoltaického článku je, aby foton ze slunečního záření uvolnil v látce elektron za vzniku páru elektron – díra. V kovech dochází k okamžité rekombinaci tohoto páru, proto je třeba rekombinaci zabránit a vzniklý náboj odvést z článku. Pro odvedení náboje se používá polovodičů, kde jsou elektrony a díry separovány vnitřním elektrickým polem PN přechodu [40].

Nejjednodušší FV článek můžeme popsat jako velkoplošnou diodu s jedním PN přechodem, který zajišťuje podmínky pro fotovoltaickou přeměnu. Nutné podmínky jsou: dopadající foton musí být pohlcen, foton musí excitovat elektron do vyššího vodivostního pásu, vzniklý pár elektron (–) – díra (+) musí být separován, aby se znovu nespojil a tyto oddělené náboje jsou následně odvedeny ke spotřebiči [40].

FV článek můžeme modelovat náhradním obvodem dle Obrázek 36. Ozářená oblast PN přechodu generuje proud I_{PV} s určitou proudovou hustotou J_{PV} . Oblast typu P se nabíjí kladně, zatímco oblast typu N se nabíjí záporně. Takto je zajištěna propustná polarizace PN přechodu, kdy část generovaného proudu teče zpět diodou D. Odpor R_p představuje technologické nedokonalosti (mikrosvody), odpor R_s reprezentuje vliv odporu materiálu. Výstupní napětí FV článku U je sníženo o úbytek napětí na sériovém odporu [40]. Samotné články se pro přehlednost rozlišují do několika generací.



Obrázek 36: Náhradní schéma fotovoltaického článku [40]

4.1.1 Články první generace

Tyto články jsou vyráběny z destiček monokrystalického křemíku, ve kterých je vytvořen velkoplošný PN přechod. Články první generace se vyznačují dobrou účinností a dlouhodobou stabilitou výkonu. V současnosti jsou to nejpoužívanější typy fotovoltaických článků, hlavně pro instalace velkých výkonů. Nevýhodami jsou velká výrobní náročnost a větší spotřeba čistého křemíku [41].

4.1.2 Články druhé generace

Tato generace článku je charakteristická snížením potřebného množství křemíku použitím tenkovrstvých článků. Nejběžnějšími zástupci jsou články z polykrystalického, mikrokystalického a amorfního křemíku. Jejich hlavními nevýhodami jsou nižší účinnost než u první generace, a menší stabilita účinnosti v čase. Tenkovrstvé články lze použít tam, kde je požadována pružnost a ohebnost. Příkladem jsou FV fólie plnící funkci střešní izolace a výroby elektrické energie [41].

4.1.3 Články třetí generace

Hlavním cílem článků této generace je maximální výtěžnost výkonu, tj maximalizace počtu absorbovaných fotonů za generace párů elektron – díra (proudový zisk) a maximalizace využití energie dopadajícího fotonu (napěťový zisk). Komerčně využívaným případem jsou vícevrstvé struktury, tzn, dvojrstvé a trojrstvé články, z nichž každá podstruktura (PIN) absorbuje určitou část spektra [41].

„Příkladem tandemového solárního článku je struktura skládající se z P-I-N přechodu amorfního křemíku a P-I-N přechodu mikrokystalického křemíku. Amorfni křemík má vysokou absorpci v oblasti modré, zelené a žluté části spektra, mikrokystalický křemík pak dobře absorbuje i v oblasti červené a infračervené. Mikrokystalický křemík může být nahrazen i „slitinou“ křemíku s germaniem a dle zvoleného poměru se dají upravovat jejich optické (i elektrické) vlastnosti. Tohoto materiálu se např. využívá komerčně právě pro trojrstvé solární články, kde dva spodní články jsou vyrobeny s různou koncentrací Si a Ge. Základní podmínkou pro dobrou funkci vícevrstvých článků je, aby každý z článků generoval stejný proud. V opačném případě, horší z článků limituje dosažitelnou účinnost. Výsledné napětí je pak dané součtem obou článků [41].“

4.1.4 Monokrystalické články

Monokrystalické články se vyrábí z tyčí (ingotů) polykrystalického křemíku obvykle Czochralského metodou, tj. pomalým tažením zárodku krystalu z taveniny velmi čistého křemíku. Ingoty křemíku se řezou na plátky o tloušťce 0,1 až 0,35 mm, poté se zarovnávají na rovnoměrnou tloušťku, vyleští a na povrchu odleptají pro odstranění nepravidelností a nečistot. PN přechod se na destičkách vytvoří přidávkem fosforu, který vytvoří vrstvu s vodivostí typu N [41].

4.1.5 Polykrystalické články

Polykrystalické články se vyrábějí odléváním čistého křemíku do forem a vzniklé ingoty se řežou na tenké plátky. Odlévání je mnohem jednodušší metodou než tažení monokrystalů. Lze tedy připravit čtvercový nebo obdélníkový průřez. Takto vyrobené články mají horší elektrické vlastnosti, protože na styku jednotlivých krystalických zrn je větší odpor. Výhodou je však finanční úspora při výrobě [41]. Náhodná orientace krystalických zrn neumožňuje texturaci povrchu alkalickým leptáním a na styku jednotlivých zrn se zvyšují ztráty rekombinací [40].

4.1.6 Články z amorfního křemíku

Na výrobu těchto článků se oproti předešlým dvěma zmíněným typům spotřebuje méně materiálu, což se při velkosériové výrobě kladně promítne do ceny. Vyrábí se rozkladem vhodných sloučenin křemíku ve vodíkové atmosféře. Tímto rozkladem se dají připravit velmi tenké vrstvy křemíku na skleněné, nerezové nebo plastové podložce. Amorfni vrstva znamená to, že nemá pravidelnou krystalickou strukturu a obsahuje určité množství vodíku. Díky větší absorpci slunečního záření je možno vyrábět články o tloušťce 1 μm , které pohltnou 90 % slunečního záření, což je vhodné pro výrobu ohebných fotovoltaických článků. Takto vyrobený článek má oproti krystalickému křemíku méně pravidelnou strukturu s větším množstvím poruch. Některé atomy křemíku tak nemohou vytvořit vazbu, vznikají tzv. nenasycené vazby snižující účinnost. Snížení hustoty nenasycených vazeb je možno docílit jejich pasivací, nejčastěji vodíkem [41].

Tabulka 9: Účinnosti jednotlivých typů FV článků [40]

Typ solárního článku	Typická efektivita článku za běžných podmínek	Maximální naměřená efektivita článku za běžných podmínek	Maximální naměřená hodnota článku v laboratoři
	(%)	(%)	(%)
Monokrystalický křemík	12 – 16	22	25
Polykrystalický křemík	11 – 14	16	20
Amorfni křemík	5 – 7	10	13

4.2 Střídače

Střídač je jednou ze základních částí fotovoltaické elektrárny, který udává její funkce, parametry dodávané elektrické energie, její směr a výkon. Podle možnosti zapojení rozlišujeme fotovoltaické elektrárny na ostrovní, připojené k elektrizační soustavě a hybridní [42],[40]. V menších elektrárnách zastávají střídače funkci regulátoru, střídače, funkci ochrannou a záznamovou.

Základní funkcí střídače je přeměna stejnosměrného proudu generovaného z FV panelů na proud střídavý, na který jsou konstruovány běžné spotřebiče. Typický střídač

hybridních systémů má tedy stejnosměrnou stranu, kde řídí energii z FV panelů, případnou akumulaci do bateriového úložiště nebo do teplé vody a střídavou stranu, kde spolupracuje se spotřebiči a s distribuční sítí. Dnes už téměř každý střídač hlídá optimální výrobu solárních panelů nastavováním tzv. maximálního bodu výkonu. Dále řídí rozvod elektrické energie do spotřebičů, do akumulace a do sítě dle zadaných požadavků. V případě výpadku síťového napájení má na starosti odpojení elektrárny od této sítě a zařízení zálohování vybraných spotřebičů [42].

Střídače dále můžeme dělit na jednofázové a třífázové, podle požadavků zapojení do napájecí soustavy. Dále podle zapojení stejnosměrné strany můžeme střídače rozdělit na centrální, stringové (řetězcové) a modulové. Centrální střídače se zapojují na výstupu konkrétní FV elektrárny, stringové se zapojují k řadě spojených FV panelů a modulové se instalují k jednotlivým FV panelům.

4.3 Akumulace energie

Výroba elektrické energie fotovoltaickou elektrárnou je ovlivněna několika faktory, z nichž nejvýznamnějším je vliv počasí. Vyrobenou elektrickou energii je potřeba spotřebovat, nebo akumulovat. Pro akumulaci se používají olověné akumulátory, Lithium – iontové akumulátory, či novější Lithium – železo – fosfátové baterie, průtokové baterie a gelové baterie.

4.3.1 Olověné baterie

Ač by se mohlo zdát, že olověné baterie jsou na ústupu, stále zauímají téměř polovinu celosvětově vyráběných baterií. Olověný akumulátor se skládá z nádoby, dvou elektrod odlitých z čistého olova a z vodného roztoku kyseliny sírové. Kladné i záporné elektrody mají tvar mřížky, které se plní pastou nebo se žebroují. Jedna deska je vyplněna oxidem olovičitým, má hnědou barvu, a druhá deska je vyplněna houbovým olovem a je šedá. Pro dosažení většího napětí se obvykle používá více desek, které jsou řazeny střídavě za sebou. Desky stejného druhu jsou spojeny [40].

Při vybíjení se tvoří v akumulátoru voda, proto klesá koncentrace kyseliny sírové. Při nabíjení baterie koncentrace opět stoupá, z čehož plyne, že dle hustoty kyseliny lze kontrolovat stav nabití akumulátoru. Pokud nabíjení pokračuje i po úplném nabití baterie, dochází na olověné elektrodě k tvorbě vodíku a na desce s oxidem vzniká kyslík, pak hovoříme o tom, že baterie tzv. vře. Nominální napětí jednoho článku naprázdno je 2 V. Při maximálním nabití může napětí dosahovat 2,12 V, při vybití 1,75 V a při hlubokém vybití se napětí může blížit k jednomu Voltu [40].

Hlavní nevýhodou olověných baterií je nízká hustota energie, velká hmotnost, dlouhá doba nabíjení, nižší počet cyklů vybití atd [40].

4.3.2 Lithiové akumulátory

Lithium je velmi reaktivní kov světlé barvy. Anoda je obvykle vyrobena z uhlíku, katoda

z oxidu kovů a elektrolyt je vyroben z lithiové soli v organických rozpouštědlech. Lithiové akumulátory se běžně vyrábí ve dvou variantách, a to Li – ion a Li – pol, kde hlavní rozdíl hraje použitý elektrolyt. Li – ion baterie obsahují tekutý elektrolyt, kdežto Li – pol obsahují pevný nebo gelový polymerní elektrolyt. Napětí jednotlivých článků se pohybuje okolo 3 V podle typu použitého elektrolytu a katody. Princip nabíjení je založen na vytvoření iontu z atomu lithia na katodě, který nadále putuje přes elektrolyt a separátor k uhlíkové anodě. Zde se spojuje s externím elektronem a spolu uzavírají proudovou smyčku okruhu nabíjení [40].

Výhodami jsou velká hustota energie s malou vahou, téměř nulové samovybití, články mají větší hloubku vybití bez ztráty kapacity nebo snížení životnosti, dále rychlé nabíjení i vybití (vhodnost pro dynamické systémy) a dlouhá životnost [40].

4.3.3 Lithium – železofosfátové baterie

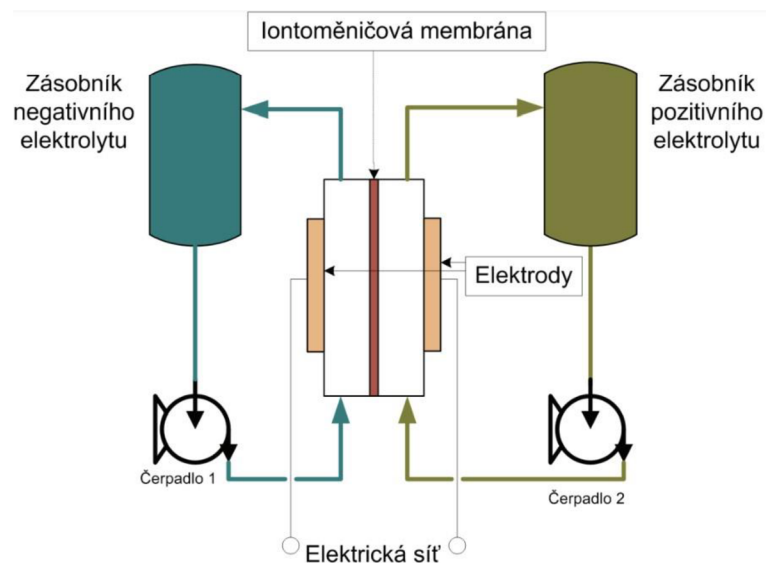
LiFePO₄ baterie jsou typem lithium – iontových baterií, které jako katodový materiál používají fosforečnan železitý. U běžných lithium – iontových baterií se používá například oxid kobaltu, oxid manganu nebo oxid niklu [43].

Vzhledem k tomu, že tyto baterie neuvolňují kyslík ani mangan, jsou lithium-železofosfátové katody chemicky stabilnější než jiné Li – ion technologie, jako jsou baterie s oxidem kobaltu. Baterie jsou proto méně náchylné k požáru a výbuchu, a proto je jejich použití bezpečnější. U tohoto typu baterie je také vyšší počet nabíjecích cyklů. Stabilita kladné elektrody umožňuje prodloužit jejich životnost a ušetřit až 30 % energie ve srovnání s jinými lithium-iontovými bateriemi. Velkou nevýhodou LiFePO₄ baterií je jejich nižší hustota energie ve srovnání s technologiemi na bázi kobaltu. Naopak výhodou jsou použité materiály šetrnější k životnímu prostředí [43].

Hmotnostní hustota energie lithium – železofosfátových baterií byla v roce 2017 od 90 do 120 Wh · kg⁻¹. U běžných lithiových baterií dosahovala hmotnostní hustota energie 150 až 200 Wh · kg⁻¹. Díky pokroku dosaženému s touto technologií byla hmotnostní energetická hustota baterií v roce 2020 odhadnuta na 200 Wh · kg⁻¹. Počet nabíjecích cyklů je předpokládán od tří do deseti tisíc cyklů v závislosti na podmínkách používání, jako je například hloubka vybití, okolní teplota atd. Průměrná životnost se odhaduje na 7 let [43].

4.3.4 Průtokové baterie

Průtokové baterie jsou nabíjeny stejným způsobem jako konvenční baterie. Energie je v nich uskladněna v tekutém elektrolytu. Elektrolyt je pomocí čerpadel vháněn do zásobníků, ze kterých se čerpá zpět do chemického článku. Tyto baterie pracují na principu elektrochemické oxidace a redukce vanadu – VRB, uskladnění pomocí halogenu Br – ZnBr nebo na roztoku Polysulfid Bromidu [40].



Obrázek 37: Princip průtokové baterie [40]

VRB – redoxovým systémem se rozumí oxidace a redukce. Oddělejícím faktorem mezi dvěma elektrolyty je iontoměničová membrána. Při nabíjení dochází k iontové výměně mezi dvěma elektrolyty, proto je na oddělení těchto dvou elektrolytů nutná iontová – propustná polymerní membrána, pracující podobně jako palivový článek. Hlavní výhodou *VRB* článku je jeho reverzibilita, tj. v tomtéž elektrochemickém článku může probíhat nabíjení i vybíjení. Napětí nabitého článku je při standardní teplotě 1,35 V, ve vybitém stavu 1 V.

Elektrolyt má při cirkulaci článkem nepatrné samovybíjení, pokud je tedy uskladněn mimo článek, zůstává nabitý po neomezenou dobu. Akumulační kapacita je dána množstvím elektrolytu v zásobnících, který představuje přibližně 90 % hmotnosti celého zařízení i zastavěné plochy. Zbylé procenta připadají na samotné *VRB* články a kontrolní a řídicí elektroniku. Životnost se předpokládá na více než 15 000 cyklů. Při neustálém provozu je nutná výměna oběhových čerpadel elektrolytu dle provozu po 5 až 7 letech. Vanadiová redoxová baterie je považována za vhodnou možnost akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů [40].

4.4 Potenciál solární energie

Předpokládaný výkon solárních elektráren v České republice umístěných na střechách obytných i průmyslových budov do roku 2030 je 3,9 GW, do roku 2050 pak 7,1 GW, tj. téměř o 5 GW více oproti současnosti. Tento výkon odpovídá pokrytí střech asi 35 km². FV elektrárnu používají 4 % domácností dle studie z června 2022. Dále podle této studie by instalace FV elektráren na všechny technicky vhodné střechy pokryla 6 % z celkové spotřeby elektrické energie roku 2021, která činila 73,4 TWh. Podle Vnitrostátního plánu pro energetiku a klima z roku 2019 by měl instalovaný výkon FV elektráren růst v průměru o 180 MWp ročně, kterého se zatím nedosáhlo [44].

Ze studie dále vyplývá, že FV elektrárnami lze osadit až 21 km² střech rodinných domů, 11 km² bytových a obecních domů a 3 km² průmyslových objektů. Vzhledem k orientaci střechy, rozmístění oken, komínů atd. lze většinou efektivně využít třetinu střešní plochy, pokud nehrozí zastínění okolím, tzn. stromy a budovami, kdy střechy přestávají být vhodné pro instalaci FV elektrárny. U střech průmyslových objektů je využitelná část ještě menší, závislá na vlivech zastínění výtahy, chladicími technologiemi a telekomunikačními zařízeními. Dále u kancelářských a komerčních budov, umístěných v centrech měst, se často naráží na problém památkově chráněných území [44].

Teoretický potenciál solární energie je reprezentován fyzikální proměnnou s názvem globální horizontální ozáření, které je součtem složek přímého a difúzního ozáření přijímaného horizontálním povrchem, jednotkou je kWh · m⁻². Globální horizontální ozáření umožňuje porovnat přírodní podmínky pro realizaci FV zdroje bez uvážení konkrétního technického provedení a způsobu provozu. Dle studie Global Photovoltaic Power Potential by Country je GHI modulováno teplotou vzduchu, větrem, sněhem, znečištěním atmosféry atd. Dále je GHI považováno za zjednodušenou aproximaci a plně nepopisuje skutečný potenciál pro výrobu FV energie. Pro ilustraci FV potenciálu se používá FV výkonový výstup (PVOUT), definovaný jako specifický výnos. PVOUT představuje množství energie vyrobené na jednotku instalovaného FV výkonu v dlouhodobém horizontu. Jednotkou je kWh · kWp⁻¹ [45].

Dále tato studie popisuje tři úrovně praktického potenciálu. Úroveň 0 nebere v úvahu žádná omezení pro vývoj a provoz FV elektráren. Úroveň 1 vylučuje oblasti kvůli fyzickým či technickým omezením. Úroveň 2 uvažuje s oblastními omezeními předepsanými národními či regionálními orgány. Jako další studie definuje index sezónnosti, tj. poměr mezi nejvyšším a nejnižším měsíčním úhrnem. Země s vysokým potenciálem mívají nízký index sezónnosti (obvykle méně než 2) a naopak. Celkem 86 % světové populace žije ve 150 zemích s průměrným indexem sezónnosti nižším než 2 a specifickým výnosem 3,5 kWh · kWp⁻¹ [45].

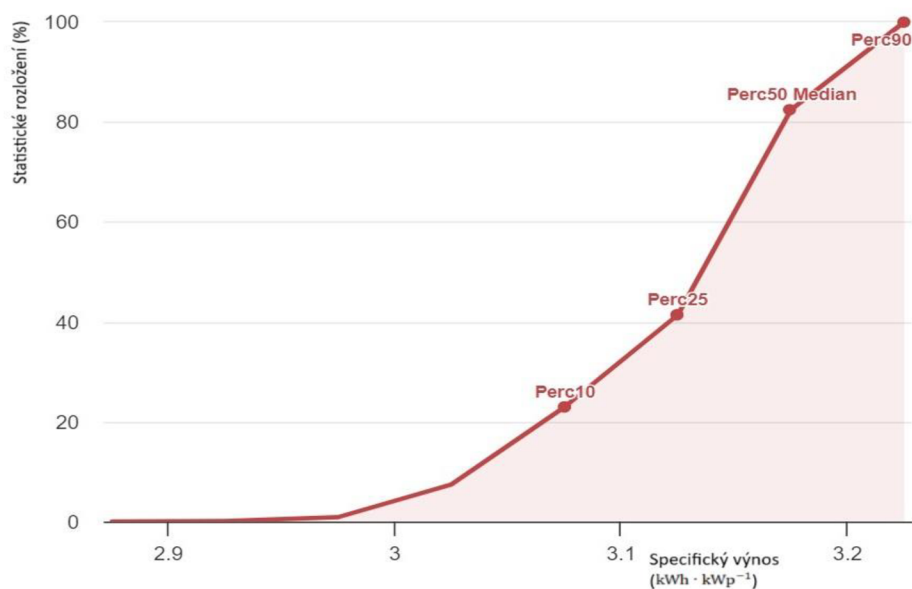
Za účelem porovnání nákladů na solární energii a na elektrickou energii získanou pomocí jiného principu přeměny je definován ekonomický potenciál [45].

Tabulka 10: Statistika specifického výnosu pro Jihomoravský kraj [46]

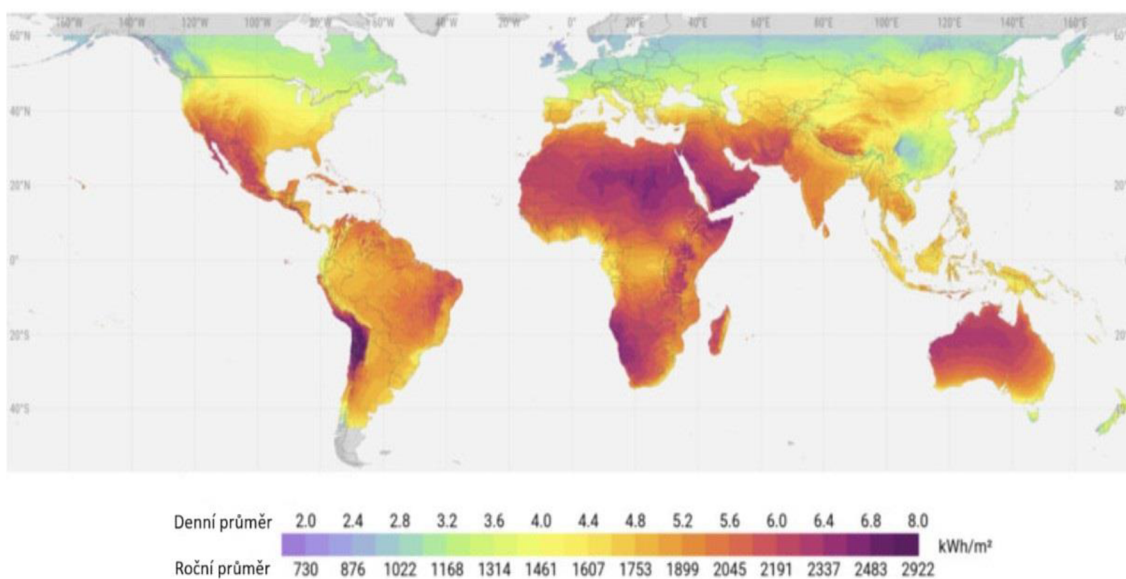
Specifický výnos	(kWh · kWp ⁻¹)
Průměrný	3,15
Maximální	3,23
Minimální	2,98
90 percentil	3,21
75 percentil	3,19
Medián	3,16
25 percentil	3,11
10 percentil	3,06

Tabulka 11: Specifické veličiny FV potenciálu pro Jihomoravský kraj [46]

Veličina	Minimum	Maximum	Jednotka
Specifický výkon	2,98	3,23	$\text{kWh} \cdot \text{kWp}^{-1}$
Přímé normální ozáření	2,64	3,02	$\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$
Globální horizontální ozáření	3,08	3,3	$\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$
Difúzní horizontální ozáření	1,59	1,64	$\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$
Globální šikmé ozáření	3,55	3,88	$\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$
Optimální sklon	35	37	°
Teplota vzduchu	7,4	10,9	°C



Obrázek 38: Statistické rozložení specifického výkonu pro Jihomoravský kraj [46]



Obrázek 39: Dlouhodobý světový průměr GHI, upraveno z [45]

5. NÁVRH SOLÁRNÍHO SVÍTIDLA

Jak zadání napovídá, cílem této diplomové práce je prototyp svítidla, který bude možné dále zdokonalovat. Prvotním úkolem tedy bylo vybrat vývojovou platformu, na které bude prototyp založen. Z populárních platforem se nabízelo Arduino, Raspberry Pi, ESP8266 a ESP32. Pro předchozí zkušenosti autora diplomové práce a preference vedoucího práce byla vybrána platforma Arduino.

Samotná vývojová deska Arduino Uno, výběr vhodného světelného zdroje a solárního panelu udaly napěťové požadavky celého systému. Obecně se doporučuje pro Arduino Uno volit napájecí napětí v rozsahu 7 až 12 V. Dle kapitoly 3.3 byl vybrán světelný LED pásek se třemi druhy LED diod v pouzdru SMD 2835 v provedení RGB, 1 800 K a 6 500 K, s plným spektrem pro bílé barvy světla a indexem podání barem $R_a > 95$. RGB čipy mají příkon $14,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$, bílé čipy pak $9,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$. Pro účely svítidla byly použity pouze bílé čipy, s udávanou svítivostí $500 \text{ lm} \cdot \text{m}^{-1}$ pro 1 800 K a $800 \text{ lm} \cdot \text{m}^{-1}$ pro 6 500 K. Napájení LED pásku je 24 V stejnosměrného napětí [47]. Dále byl především podle požadavku přenosnosti lampy vybrán napájecí solární panel o jmenovitém napětí 12 V s výkonem 6 W. Rozměry panelu jsou 17 x 20 cm [48]. Tyto tři napěťové hladiny daly podnět pro výběr bateriového uložení složeného ze tří sériově zapojených článků Li – ion typu 18650, dnes již velmi rozšířeného od elektronických cigaret, přes aku vrtačky až po baterie elektromobilů. Udávané jmenovité napětí takto zapojených článků je 10,8 V, reálně je však vyšší, přibližně 12,4 V. Byly použity články s kapacitou 2 000 mAh. Vhodnější by se jevilo zvolit solární panel se jmenovitým napětím 24 V, aby nebylo třeba napětí měnit na vyšší i na nižší hladinu. Kvůli téměř dvojnásobným rozměrům tak zvoleno nebylo. Při výběru LED pásku s plným spektrem vyzařování nebyla možnost výběru, protože v typické 12 V verzi plnospektrální pásky nejsou zatím k dostání.

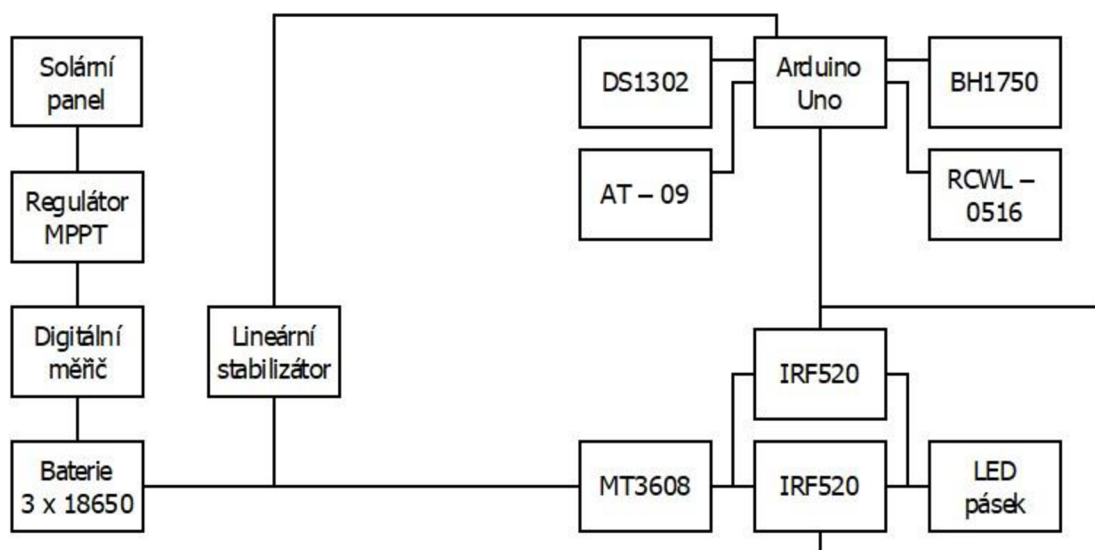
Dalším úkolem tedy bylo, jakým způsobem upravovat napětí na požadované hladiny z baterií. Pro napájení samotného Arduina byl použit lineární stabilizátor napětí na 9 V s proudovým výstupem maximálně 1 A. Pro řízení LED pásku byly použity PWM digitální výstupy desky Arduino Uno. Tyto výstupy řídí záporný pól na hladině 5 V, proto bylo zapotřebí zvolit vhodné tranzistory typu MOSFET NPN napájené ze zvyšujícího DC – DC měniče. Posledním úkolem ohledně napájení systému bylo vhodně zvolit solární nabíjecí regulátor, kde byl vybrán regulátor s MPPT trackerem.

V tomto bodě návrhu již bylo možné přemýšlet o řídicích perifériích. Prvním uživatelsky důležitým ukazatelem byla vizuální kontrola stavu baterie, kde byl zvolen digitální ukazatel napětí, proudu, odporu a kapacity pro představu uložené energie. Nakonec bylo důležité vybrat ovládací prvky Arduino desky. Prvním zvoleným prvkem byl modul reálného času, pomocí kterého se řídí náhradní teplota chromatičnosti světla (dále jen teplota chromatičnosti) v průběhu dne. Dále byl vybrán Bluetooth modul, pomocí kterého se skrze aplikaci v chytrém telefonu celá soustava ovládá. Pro možnost

ovládání podle vnějších vlivů bez zásahu lidské činnosti byl zvolen soumrakový senzor a čidlo pohybu.

5.1 Součástky vybrané pro testovací prototyp

- a) Solární panel 12 V, 6 W.
- b) Regulátor MPPT 6 – 36 V, 5 A, modul s displejem.
- c) Držák baterie 3 x 18650.
- d) 3 x baterie Li – ion typu 18650 s kapacitou 2 000 mAh.
- e) Digitální měřič lithiových baterií – napětí, proudu, odporu a kapacity.
- f) Lineární stabilizátor napětí 9 V, 1 A.
- g) Arduino Uno.
- h) Modul reálného času DS1302.
- i) Bluetooth modul AT – 09 BLE.
- j) Modul pro měření intenzity světla BH1750.
- k) Mikrovlnný radarový senzor RCWL – 0516.
- l) Step up modul napájení MT3608, 2 A, DC – DC.
- m) 2 x spínací modul IRF520 MOSFET.
- n) Plnospektrální LED pásek, 24 V.



Obrázek 40: Blokové schéma testovacího prototypu (ProfiCAD)

Takto navržený obvod byl sestaven a proběhlo první testování pro ověření správnosti zapojení. Zpočátku nebyly zjištěny žádné nedostatky. Součástky byly vybírány na základě předchozích zkušeností autora a uživatelských recenzí součástek. Arduino je open source platforma, proto má bohatou škálu diskusí a vzorových zdrojových kódů, které se obvykle dají využít pro ověření funkčnosti konkrétního prvku v obvodu.

6. KONSTRUKCE SOLÁRNÍHO SVÍTIDLA

Za předpokladu, že byly zvoleny všechny potřebné prvky obvodu a byly správně zapojeny nastala fáze programování. Ve fázi programování bylo nutno rozhodnout, jaké funkce bude vlastní svítidlo mít. Kvůli zvolené vývojové desce Arduino Uno a počtu obsazených pinů s podporou pulzní šířkové modulace bylo zvoleno ovládání pouze skrze mobilní aplikaci. Nabízela se i možnost manuálního ovládání pomocí rotačních enkodérů.

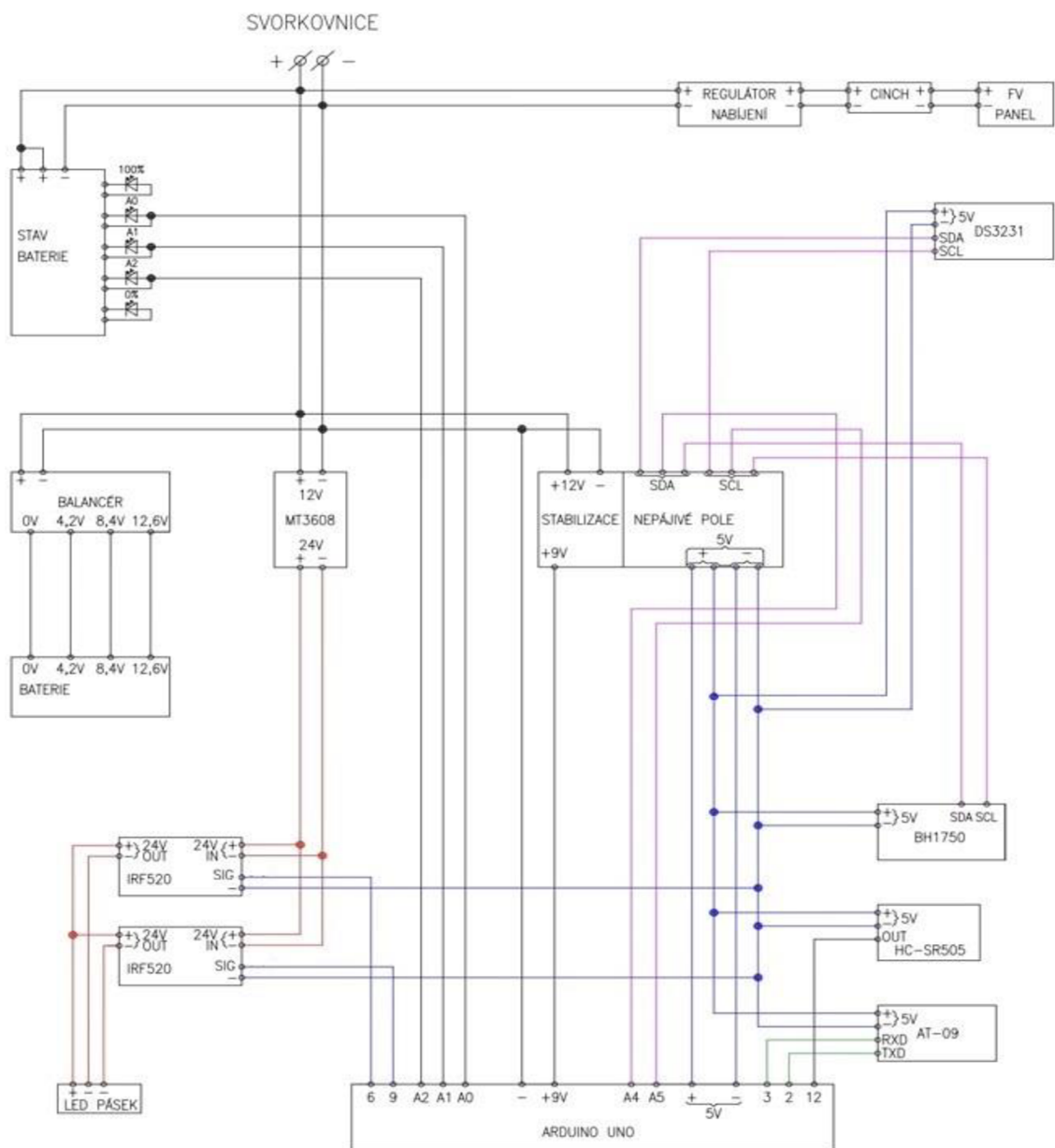
První funkce svítidla byla zvolena jako klasické ovládání pomocí spínače s funkcí zapnout a vypnout. Další funkcí je aktivace pohybového senzoru, který spíná LED pásek na dobu 10 sekund. Předposlední funkcí v automatickém režimu je aktivace soumrakového senzoru, který spíná LED pásek defaultně při hodnotě rovné nebo menší, než je 40 luxů. Poslední funkcí je zrychlený mód za účelem prezentace změny teploty chromatičnosti svítidla v průběhu dne. Automatický režim znamená automatické nastavení teploty chromatičnosti podle denní doby. V manuálním režimu je možné pomocí posuvníků nastavovat teplotu chromatičnosti a jas svítidla. Tento režim byl zvolen kvůli odlišným preferencím uživatelů.

V průběhu programování se objevila spousta nedokonalostí prvotního návrhu obvodu. Prvním nevyřešeným a neznámým problémem je nutnost otevřít sériový monitor v programu Arduino IDE při nahrávání zdrojového kódu do vývojové desky, což není běžné. Dále se ukázala nepřesnost modulu reálného času DS1302, kdy náhodně udával čas půlnoci v libovolnou denní dobu, což způsobovalo blikání LED diod teploty chromatičnosti 6 500 K. Proto tento modul byl nahrazen modulem s označením DS3231. Původní pohybový senzor pracující na Dopplerově jevu fungoval pouze na vzdálenost několika centimetrů, i když udávaný rozsah byl 7 metrů. Proto byl senzor vyměněn za PIR senzor pohybu HC-SR505. Zvolený regulátor napětí nebyl schopen udržet požadované výstupní napětí 12,6 V pro nabíjení baterií nově opatřených ochranným balancérem, proto byl nahrazen jiným konvertorem, také doporučeným pro solární nabíjení. Bateriový box byl zdvojnásoben pro možnost do budoucna zvýšit kapacitu baterií výměnou za články s větší kapacitou a paralelním zapojením. Poslední zásadní změnou byla výměna digitálního měřiče, který obsahoval pouze displej, ze kterého nebylo možno data nijak využít, za indikátor napětí baterie s LED diodami. Na tomto indikátoru lze využívat výstupní napětí na diodách, kterým je ovládán výsledný jas LED pásku či standby režim desky Arduino Uno.

6.1 Součástky vybrané pro konstrukci prototypu

- a) Solární panel 12 V, 6 W.
- b) Boost – buck step up/down modul solárního napájení XL6009.
- c) 2 x držák baterie 3 x 18650.
- d) 3 x baterie Li – ion typu 18650 s kapacitou 2 000 mAh.
- e) Modul indikace napětí s LED 775-220.

- f) Ochranný obvod a balancér pro 3 Li – ion články 18650 M402G.
- g) Konektor Cinch pro možnost připojení externího zdroje napájení.
- h) Lineární stabilizátor napětí 9 V, 1 A.
- i) Arduino Uno.
- j) Modul reálného času DS3231.
- k) Bluetooth modul AT – 09 BLE.
- l) Modul pro měření intenzity světla BH1750.
- m) PIR senzor pohybu HC-SR505.
- n) Step up modul napájení MT3608, 2 A, DC – DC.
- o) 2 x spínací modul IRF520 MOSFET.
- p) Plnospektrální LED pásek, 24 V.



Obrázek 41: Schéma zapojení solárního svítidla (AutoCAD)

6.2 Automatický režim

Jak již bylo zmíněno, automatický režim mění teplotu chromatičnosti v průběhu dne. O časový údaj se stará modul DS3231, který v každém okamžiku posílá aktuální hodnotu času do desky Arduino Uno. Nastavení teploty chromatičnosti se řídí podle následující tabulky, která byla vytvořena podle preferencí autora.

Tabulka 12: Teplota chromatičnosti svítidla v automatickém režimu

Čas od (hod)	Čas do (hod)	Teplota chromatičnosti od (K)	Teplota chromatičnosti do (K)
21	5	1 800	1 800
5	6	1 800	2 800
6	7	2 800	4 000
7	8	4 000	6 500
8	18	6 500	6 500
18	19	6 500	4 000
19	20	4 000	2 800
20	21	2 800	1 800

Tato tabulka je reprezentována zdrojovým kódem:

```
if (startingHour <= 5 || startingHour >= 21) {
    actualWhiteColor = 0;
    switch(startingHour) {
        case 21:
        case 22:
            actualOrganeColor = ((actualBrightness
map(startingMinutes, 0, 60, 255, 230)) / 100); break; *
        case 23:
            actualOrganeColor = ((actualBrightness
map(startingMinutes, 0, 60, 230, 205)) / 100); break; *
        case 0:
            actualOrganeColor = ((actualBrightness
map(startingMinutes, 0, 60, 205, 180)) / 100); break; *
        case 1:
            actualOrganeColor = ((actualBrightness
map(startingMinutes, 0, 60, 180, 180)) / 100); break; *
        case 2:
            actualOrganeColor = ((actualBrightness
map(startingMinutes, 0, 60, 180, 205)) / 100); break; *
        case 3:
            actualOrganeColor = ((actualBrightness
map(startingMinutes, 0, 60, 205, 230)) / 100); break; *
        case 4:
            actualOrganeColor = ((actualBrightness
map(startingMinutes, 0, 60, 230, 255)) / 100); break; *
    }
    } else if (startingHour >= 5 && startingHour < 6) {
        actualWhiteColor = ((actualBrightness * map(startingMinutes,
0, 60, 0, 88)) / 100);
        actualOrganeColor = ((actualBrightness * map(startingMinutes,
0, 60, 255, 167)) / 100);
    } else if (startingHour >= 6 && startingHour < 7) {
        actualWhiteColor = ((actualBrightness * map(startingMinutes,
```


Funkce `map()` v programu Arduino IDE slouží k mapování hodnoty z jednoho rozsahu na jiný. Syntaxe funkce je následující:

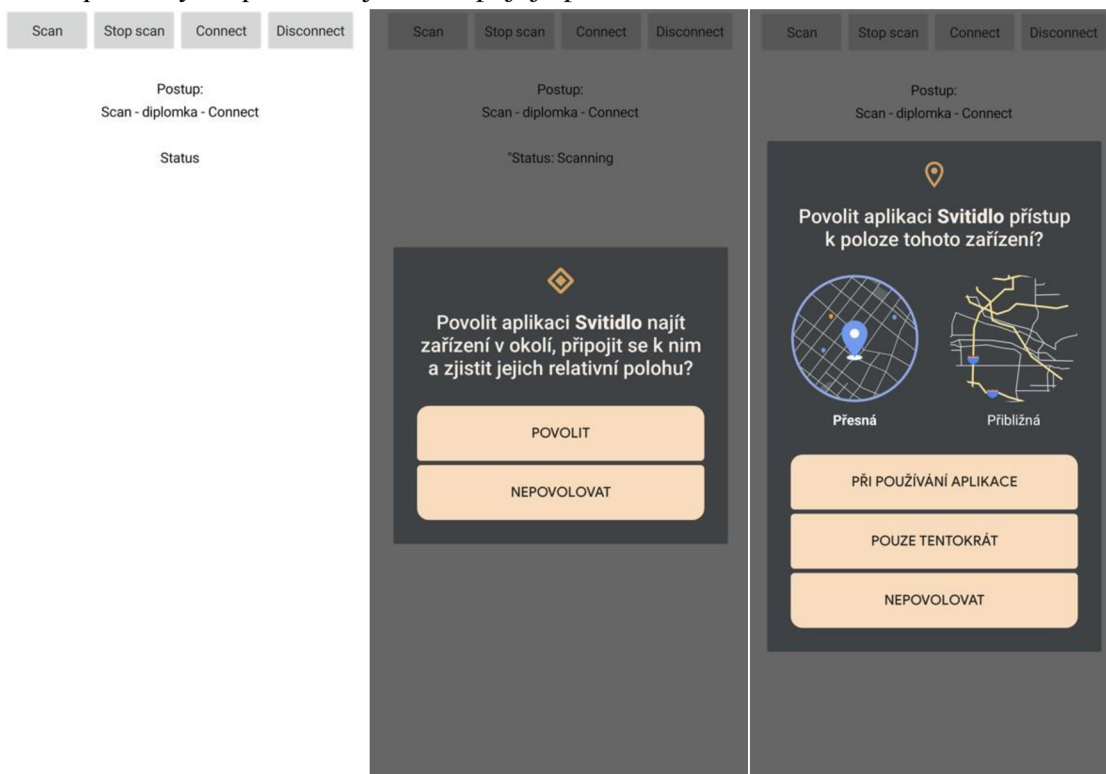
```
map(value, fromLow, fromHigh, toLow, toHigh);,
```

kde `value` je hodnota, kterou chceme mapovat, `fromLow` je dolní mez původního rozsahu hodnot, `fromHigh` je horní mez původního rozsahu hodnot, `toLow` je dolní mez cílového rozsahu hodnot a `toHigh` je horní mez cílového rozsahu hodnot. Prakticky je tato funkce využita ke změně střídy v čase. Tímto způsobem je zaručena plynulá změna teploty chromatičnosti svítidla v automatickém režimu.

Výsledné dělení hodnot proměnných hodnotou 100 je použito z důvodu výpočtu procentuální hodnoty jasů, kterou se zvyšuje v intervalu 2 sekund jas na 100 % od sepnutí. Záměrem bylo dosáhnouti plynulejšího nárůstu jasů pro zrakovou pohodu. Jas v automatickém režimu je nastaven na 100 % a nelze ho měnit.

6.3 Automatický režim – ovládání

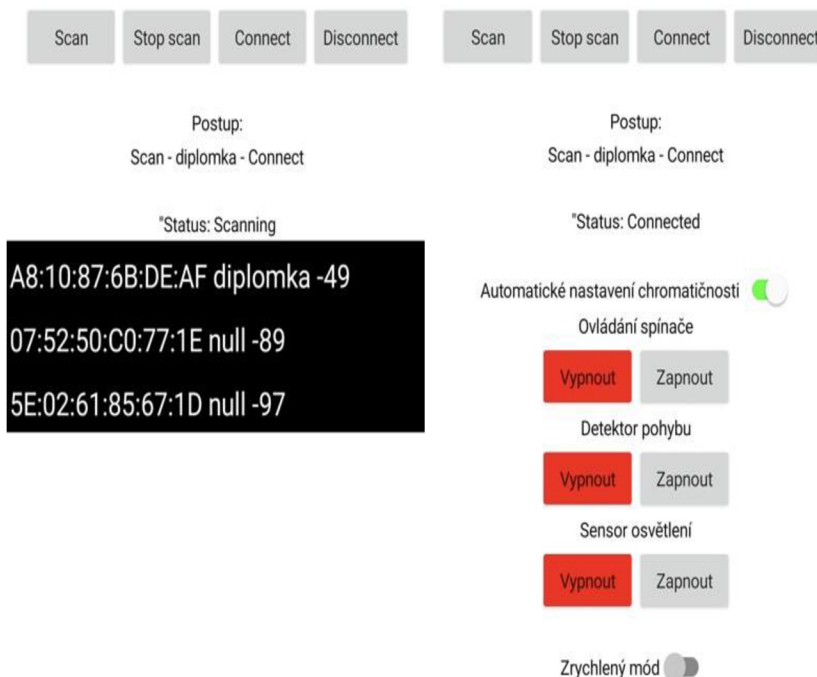
Pro tvorbu vlastní mobilní aplikace určené k ovládání mikrokontrolérů Arduino se doporučuje moderní programovací jazyk Kotlin. Kvůli náročnosti a uživatelsky nepřiznivému vývojovému prostředí bylo zvoleno vývojové prostředí s názvem MIT App Inventor. Toto vývojové prostředí je online platforma, pomocí které lze vytvářet mobilní aplikace pro systém Android bez hluboké znalosti programování. V této platformě se vytváří zdrojový kód pomocí bloků s příkazy, které lze spojovat systémem zámků a proti zámků podobným způsobem jako se spojuje puzzle.



Obrázek 42: Aplikace Svitidlo – postup párování

Pro instalaci aplikace v operačním systému Android je nutné v první řadě v chytrém telefonu povolit instalaci aplikací z neznámých zdrojů. Aplikace Svitidlo je umístěna na konci tohoto dokumentu spolu se zdrojovým kódem v Seznamu příloh.

Po její úspěšné instalaci a otevření se zobrazí úvodní screen zobrazený na Obrázek 42 vlevo, který uživatele vybízí ke spárování chytrého telefonu se svítidlem. Dle Postupu je nutno v první řadě zmáčknout tlačítko Scan, poté uživatele vyzve aplikace k udělení oprávnění, kde je doporučeno požadované oprávnění povolit. Příklady udělení oprávnění jsou taktéž na Obrázek 42 uprostřed a vpravo.



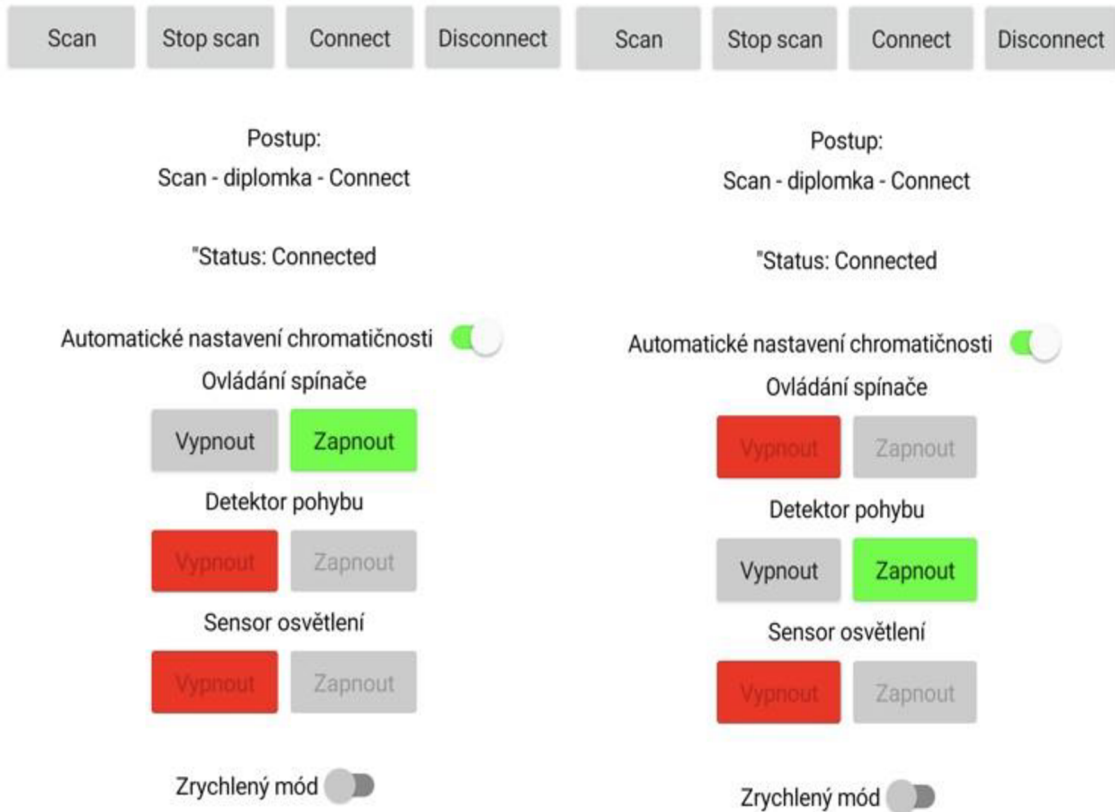
Obrázek 43: Aplikace Svitidlo – postup párování – pokračování

Dalším krokem dle Postupu je výběr zařízení, se kterým se má mobilní telefon spárovat. Uživatel v tomto kroku musí vybrat zařízení, které obsahuje v názvu popis diplomka podle Obrázek 43 vlevo. Dále dle Postupu následuje stisknutí tlačítka Connect a zobrazí se ovládání automatického režimu zobrazené na Obrázek 43 vpravo.

Bluetooth modul AT-09 není schopen přijímat jednotlivé příkazy v případě, že uživatel zmáčkne více tlačítek v krátké době po sobě. Pro zabránění případu, kdy dojde do modulu více příkazů najednou a spojí se v jeden string, na který není svítidlo schopno reagovat, byla aplikace opatřena funkcí, která po každém stisknutí ovládacího tlačítka na okamžik přejde na druhou obrazovku, kde je zobrazen nápis načítání. Následně je zabráněno aktivovat jinou funkci, dokud vybraná funkce není ukončena. Výjimkou je funkce zrychleného módu, kterou je možno aktivovat v každém zvoleném režimu, což je Ovládání spínače, Detektor pohybu a Sensor osvětlení.

V případě zapnutí režimu Ovládání spínače se změní barva tlačítka na zelenou dle Obrázek 44 vlevo, zobrazí se druhá obrazovka s nápisem načítání a další dva režimy nelze spustit. Jas svítidla se zvyšuje v intervalu 2 sekund od 0 do 100 % a teplota chromatičnosti

je nastavena dle času sepnutí, jak bylo popsáno v kapitole 6.2. Lze aktivovat funkci zrychleného módu, který zkracuje trvání jedné hodiny na dobu 3 sekund za účelem prezentace změny teploty chromatičnosti v čase. Při zmáčknutí tlačítka Zapnout se proces opakuje. Při zmáčknutí tlačítka Vypnout je jas svítidla skokově snížen ze 100 % na 0 % a aplikace se vrátí do stavu zobrazeného na Obrázek 43 vpravo skrze načítací obrazovku. Výjimkou je zrychlený mód, který zůstane ve stavu, který si uživatel zvolil.



Obrázek 44: Aplikace Svitidlo – režimy Ovládání spínače a Detektor pohybu

Funkce zrychleného módu je reprezentována zdrojovým kódem:

```
if (isSpeedUpOn) {
    delay(50); // hodina představuje 3 s ve zrychleném módu
    startingMinutes++;
    if (startingMinutes >= 60) {
        startingHour++;
        startingMinutes = 0;
    }
    if (startingHour >=24) {
        startingHour = 0;
        startingMinutes = 0;
    }
},
```

kde časová funkce delay udávaná v milisekundách zajišťuje, že je čas jedné hodiny zkrácen na tři sekundy. Tedy 1 min \approx 0,05 s, 60 min \approx 3 s.

Při zapnutí režimu Detektor pohybu zobrazeného na Obrázek 44 vpravo je postup obdobný jako u režimu Ovládání spínače. Jedinou výjimkou je zde nastavený čas 10

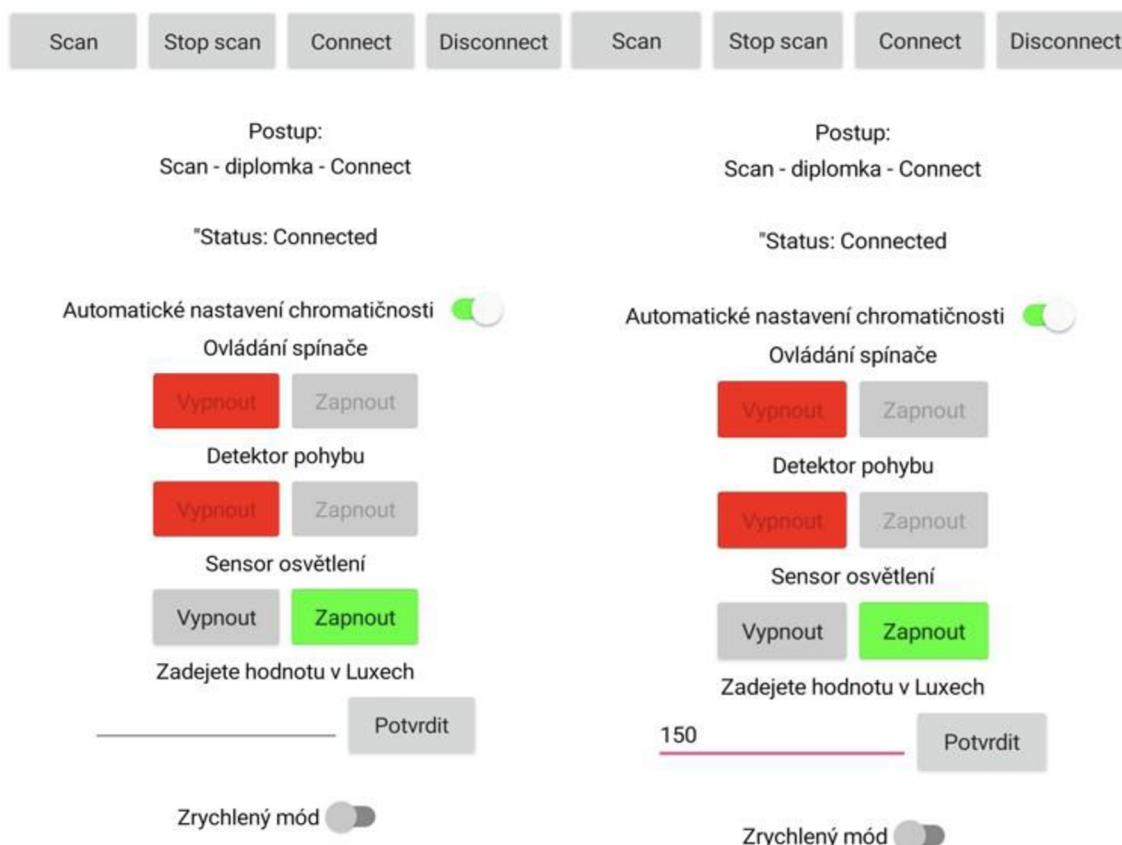
sekund, po který svítidlo svítí, poté zhasne a čeká na další impuls z čidla pohybu. Časová konstanta je reprezentována zdrojovým kódem:

```
const unsigned long motionDuration = 10000; // 10 sekund v milisekundách pro sensor pohybu,
```

kterou lze snadno nastavit na jinou hodnotu podle budoucího využití svítidla. Poté bude nutno opravený zdrojový kód znovu nahrát do vývojové desky Arduino Uno.

Pokud bude zapnut režim Sensoru osvětlení, budou opět platit stejné zásady jako u režimu Ovládání spínače. Sensor osvětlení je při prvním použití nastaven na hodnotu 40 luxů. V případě, že bude osvětlení stejné nebo nižší hodnoty, světelný zdroj bude svítit, dokud tato podmínka nebude porušena. V případě porušení podmínky bude světelný zdroj zhasnut a zařízení přejde do režimu standby, kde v intervalu osmi sekund se zařízení aktivuje, vyhodnotí hodnotu osvětlení a podle nově zjištěné hodnoty buďto rozsvítí LED pásek, nebo znovu přejde do režimu standby.

Nastavenou hodnotu osvětlení může uživatel změnit, zůstane však stejná do té doby, než ji uživatel zase změní, protože je zařízení zkonstruováno na jednosměrnou komunikaci, kdy aplikace je v roli Master a modul AT-09 v roli Slave. Aktivace režimu Sensoru osvětlení je zobrazena na Obrázek 45 vlevo a změna aktivační hodnoty s příkladem na hodnotu osvětlení od 0 do 150 luxů na Obrázek 45 vpravo.



Obrázek 45: Aplikace Svitidlo – režim Sensoru osvětlení a změna aktivační hodnoty

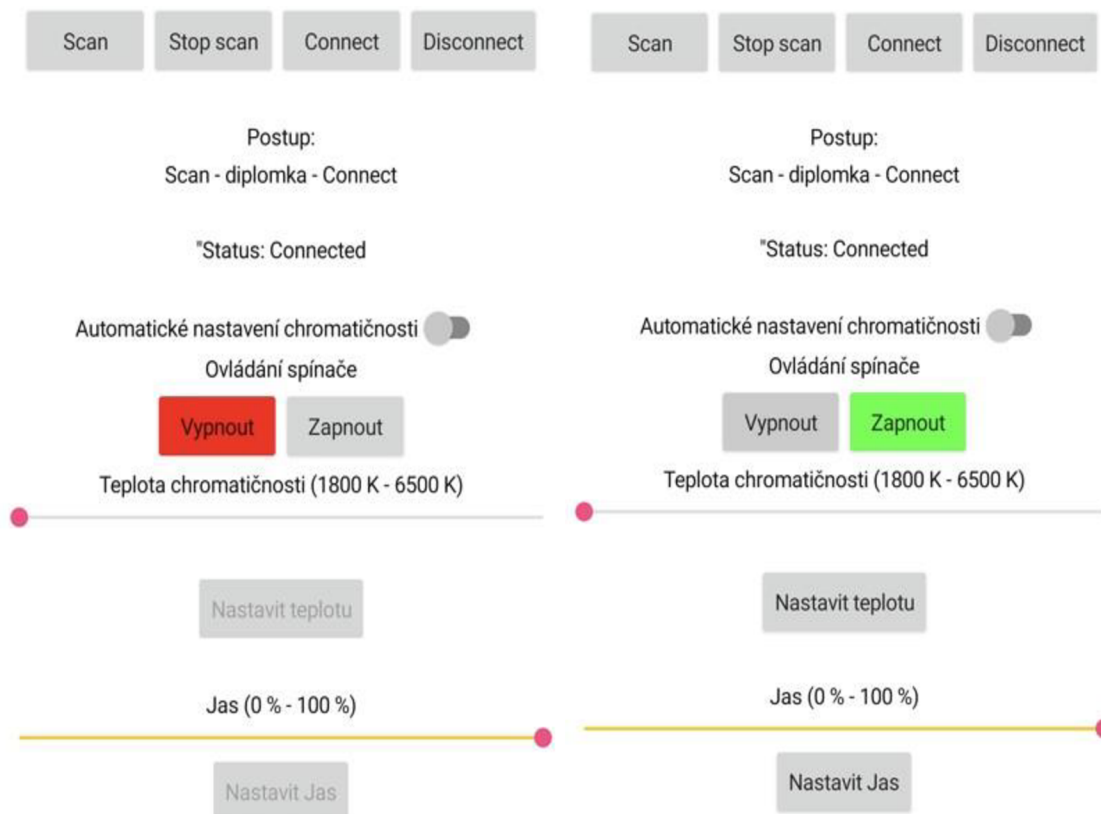
Sepnutím přepínače Automatického nastavení chromatičnosti dojde k vypnutí aktuálně zvoleného režimu, pokud je nějaký režim aktivní, světelný zdroj zhasne a

aplikace přejde do manuálního režimu. Pokud není žádný režim aktivní, aplikace se pouze přepne do režimu manuálního ovládání svítidla. Opět je při tomto procesu zobrazena druhá stránka s nápisem načítání a přepínač Zrychleného módu je nastaven do polohy vypnuto, tedy doleva.

6.4 Manuální režim – ovládání

Svítidlo je vybaveno manuálním režimem pro změnu jasu a teploty chromatičnosti podle aktuální potřeby uživatele. Když uživatel přepne aplikaci do manuálního režimu, je nastavena teplota chromatičnosti na nejnižší možnou a jas na 100 %. V tomto režimu není použita funkce postupného zvyšování jasu. Dle Obrázek 46 vlevo je vidět, že aplikace v první řadě vybízí uživatele k zapnutí režimu Ovládání spínače. Když se tak stane, zobrazí se druhá stránka s nápisem načítání, a po ukončení procesu tlačítko Zapnout zezelená dle Obrázek 46 vpravo, jak tomu bylo v automatickém režimu. V tuto chvíli svítí LED pásek na 100 % jasu s teplotou chromatičnosti 1 800 K.

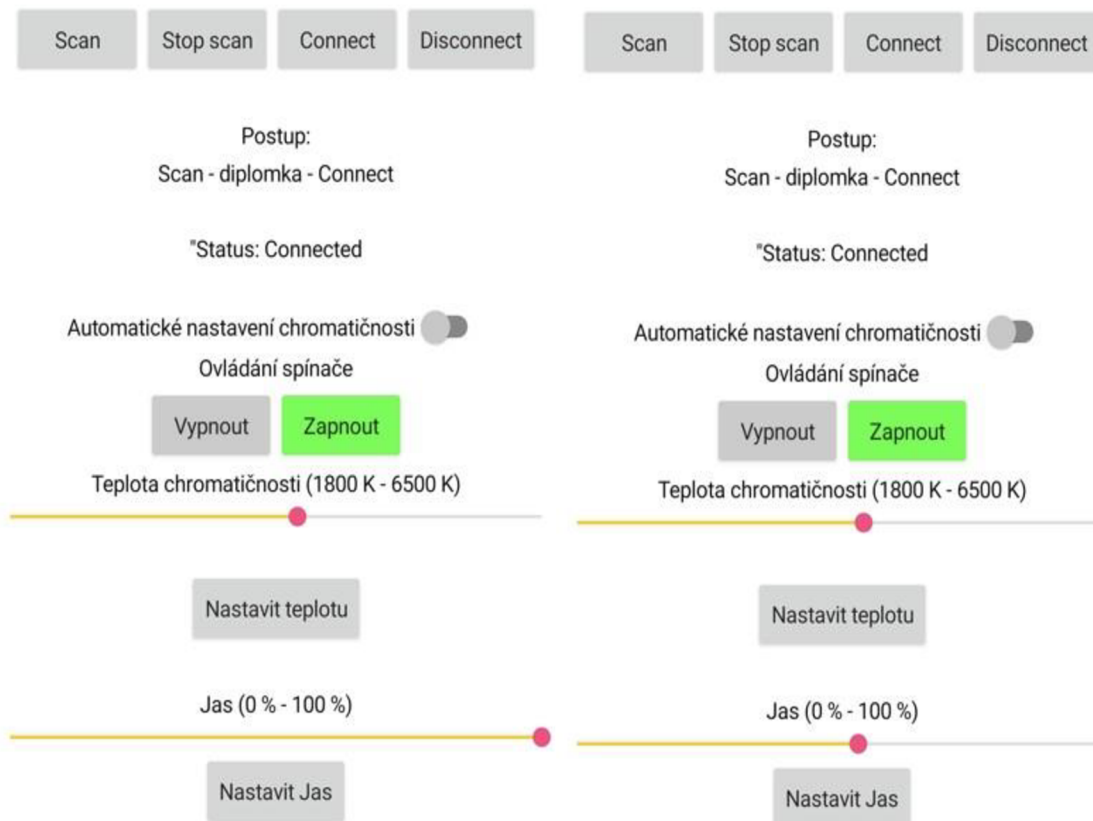
Uživatel má nyní možnost posunutím posuvníku s názvem Teplota chromatičnosti nastavit vyšší hodnotu přidáním studeně bílých LED diod. Po přetáhnutí posuvníku na zvolenou hodnotu je nutno kliknout na tlačítko Nastavit teplotu, kdy se tradičně zobrazí druhá obrazovka s nápisem načítání, po ukončení procesu se skokově změní teplota chromatičnosti svítidla na nastavenou hodnotu. Příklad nastavení posuvníku přibližně do poloviny je na Obrázek 47 vlevo.



Obrázek 46: Aplikace Svitidlo – manuální režim

Pokud by uživateli nevyhovoval zvolený jas, může postupovat obdobně jako při změně teploty chromatičnosti svítidla dle Obrázek 47 vpravo. Změna jasu je vhodná pro zrakovou pohodu především při práci v nočních hodinách.

Pro ukončení svícení v manuálním režimu může uživatel stisknout tlačítko Vypnout a zůstat v manuálním režimu. Pokud se chce uživatel vrátit do automatického režimu, může opět sepnout přepínač u nápisu Automatické nastavení chromatičnosti. Při tomto procesu je sepnuto tlačítko Vypnout a posuvníky jsou nastaveny do výchozích poloh jako při prvním přepnutí za zobrazení druhé obrazovky s nápisem načítání.



Obrázek 47: Aplikace Svitidlo – manuální režim – pokračování

6.5 Úspora energie

Použití modulu indikace 775-220 umožnilo podle napětí sériově spojených bateriových článků kontrolovat jejich stav opticky pro uživatele. Další využitelnou výhodou je fakt, že napětí na signalizačních diodách je při jejich svícení přibližně 0,8 V a při jejich zhasnutí přibližně 1,8 V. Deska Arduino Uno obsahuje analogové vstupní piny, které tuto hodnotu napětí umí rozlišovat a dále s ní pracovat. V tomto případě nelze použít digitální vstupní piny, které umí vyhodnotit pouze stav logické 0 a logické 1. Vstupní rozsah analogových pinů je od 0 do 5 V. Za těmito vstupy se skrývá analogově – digitální převodník s rozlišením 10 bitů. To odpovídá rozsahu od 0 do 1023 (2^{10}). Napětí z prostředních signalizačních diod tedy bylo přivedeno na analogové vstupní piny A0 až

A2 dle Obrázek 41. Pokud tedy zhasne oranžová signalizační LED dioda (A0 dle Obrázek 41), neprovede se žádný úkol. Pokud zhasne první zelená signalizační LED dioda (A1 dle Obrázek 41), sníží se jas LED pásku na 50 % a pokud zhasne i druhá zelená signalizační LED dioda (A2 dle Obrázek 41), Arduino Uno přejde do režimu standby za zhasnutí světelného zdroje, dokud napětí baterií zase nevzroste. Zařízení pracuje v rozsahu 12,4 až 10,8 V. Jako mezní stav bylo zvoleno 250 bitů, což odpovídá napětí 1,22 V. Ve zdrojovém kódu tato operace vypadá následovně:

```
if (signalA1 > 250) {
    actualBrightnessModifier = 2; //snížení jasu na 50 %
}
else {
    actualBrightnessModifier = 1;
}

if (signalA2 > 250) {
    impuls_z_wdt = 0;
    digitalWrite(LED_PIN_1, LOW);
    digitalWrite(LED_PIN_2, LOW);
    enterSleepMode(); //standby režim
    return;
}.
```

6.6 Zdokonalení konstrukce

Z důvodu krátké doby provozu při odběru elektrické energie z baterií došlo k jejich výměně. Nově byly použity tři články s označením INR18650M29. Označení napovídá, že jde stále o články typu 18650, ale s vyšší kapacitou 2 900 mAh. Nově použité baterie přinesly změnu napětí na hodnotu 12,2 V. Tato skutečnost se promítla do modulu indikace napětí, kde bylo nutno nově využít krajní tři zelené LED diody pro ovládání úspory energie systému. Dále bylo třeba změnit mezní stav ovládání na 400 bitů. Nový rozsah hodnot byl tedy 12,2 až 11,2 V. V poslední řadě bylo nutné nahradit modul solárního napájení za modul, který umožnil nejen napěťovou regulaci, ale také výstupní proudovou regulaci. Bez použití regulace proudu při nízké intenzitě slunečního záření klesalo výstupní napětí FV panelu k nule a nebylo ho tedy možné využít. Byl použit napájecí modul M397A.

6.7 Použitá konstrukce svítidla

Pro samotnou konstrukci svítidla byly použity dvě stolní lampy s označením Ecolite DZ11W ADEPT. Jedna konstrukce svítidla zůstala zachována, byla postavena na plastovou krabici od auto lékárny, pro ukrytí použitých součástí a část konstrukce z druhé lampy byla použita jako nosná konstrukce pro napájecí FV panel.

7. MĚŘENÍ NA PROTOTYPU

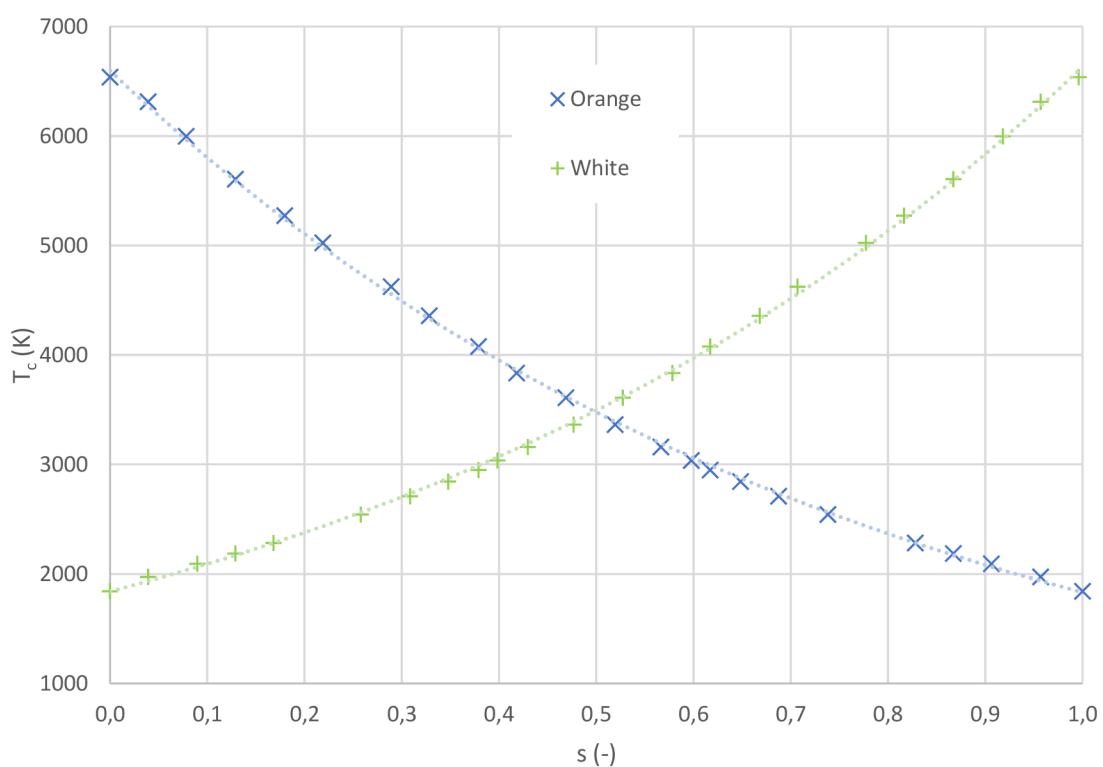
7.1 Měření pomocí ručního spektrometru

Jako první proběhlo na prototypu svítidla měření pomocí ručního spektrometru s označením LED METER MK350S. Stěžejní bylo zjistit náhradní teplotu chromatičnosti svítidla pro nastavení automatického režimu svícení popsaneho v kapitole 6.2. Naměřené hodnoty jsou zapsány v Tabulka 13, kde index O značí Orange a index W zase White.

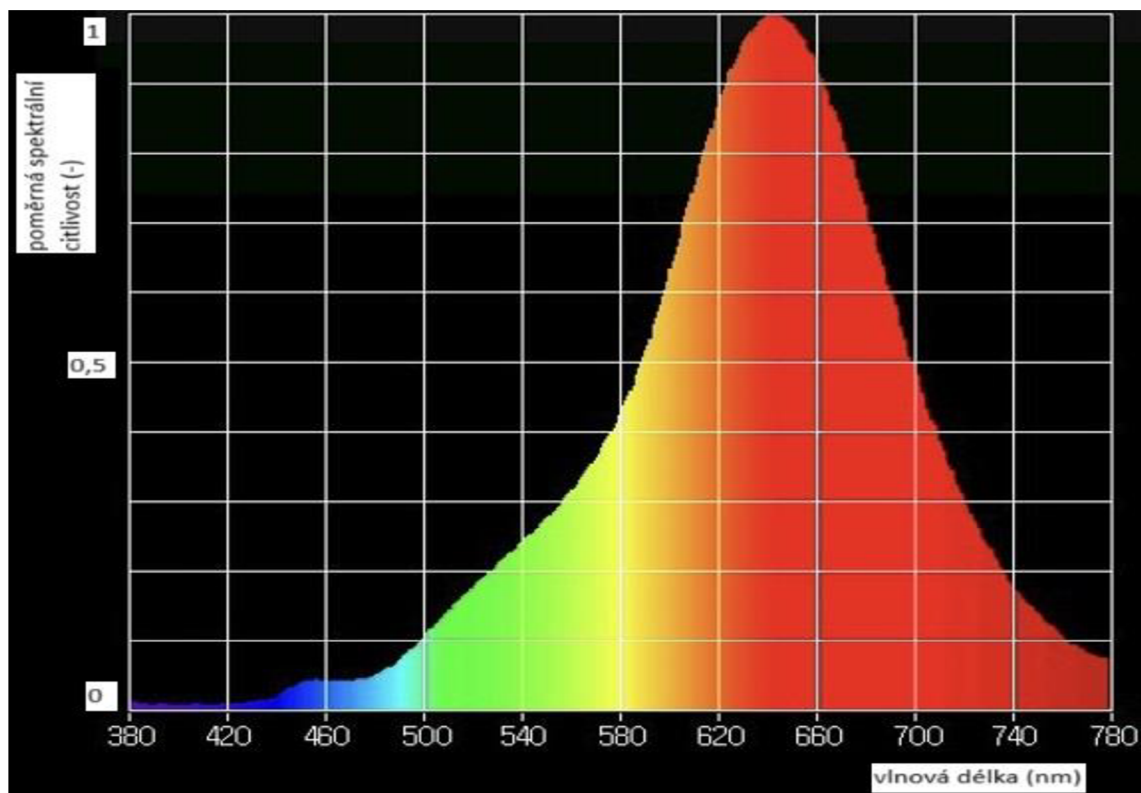
Tabulka 13: Tabulka naměřených hodnot náhradní teploty chromatičnosti v manuálním režimu

rozsah _O (bit)	rozsah _W (bit)	s _O (-)	s _W (-)	T _c (K)
255	0	1,000	0,000	1841
245	10	0,957	0,039	1972
232	23	0,906	0,090	2092
222	33	0,867	0,129	2187
212	43	0,828	0,168	2283
189	66	0,738	0,258	2542
176	79	0,688	0,309	2710
166	89	0,648	0,348	2842
158	97	0,617	0,379	2950
153	102	0,598	0,398	3036
145	110	0,566	0,430	3159
133	122	0,520	0,477	3363
120	135	0,469	0,527	3608
107	148	0,418	0,578	3834
97	158	0,379	0,617	4077
84	171	0,328	0,668	4357
74	181	0,289	0,707	4623
56	199	0,219	0,777	5023
46	209	0,180	0,816	5271
33	222	0,129	0,867	5606
20	235	0,078	0,918	5998
10	245	0,039	0,957	6313
0	255	0,000	1,000	6536

Grafická závislost teploty chromatičnosti na střídě světelných zdrojů byla vynesena do Obrázek 48. Zde je důležité si uvědomit, že součet stříd obou světelných zdrojů je vždy roven 1, proto zde platí osová souměrnost kolem osy s hodnotou stříd v bodě 0,5. Z Obrázek 48 můžeme dále vidět, že grafická závislost teploty chromatičnosti na střídě je exponenciální.

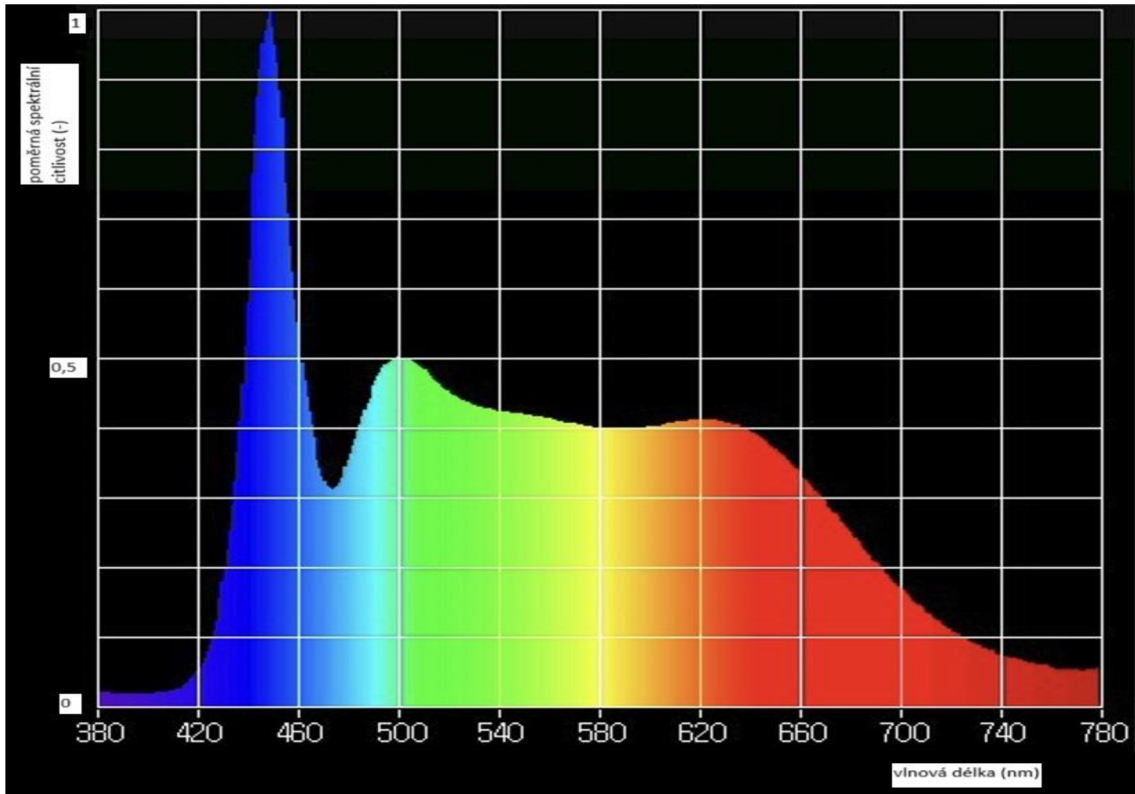


Obrázek 48: Grafická závislost náhradní teploty chromatičnosti svítidla na střídě světelných zdrojů



Obrázek 49: Spektrální křivka pro LED 1 800 K

Na Obrázek 49 můžeme vidět grafickou závislost poměrné spektrální citlivosti na vlnové délce pro světelný zdroj 1 800 K. Maximum křivky je dosaženo v bodě $\lambda_{\max} = 643 \text{ nm}$. Náhradní teplota chromatičnosti dosahuje v tomto případě 1 841 K a index barevného podání má hodnotu 96,4.



Obrázek 50: Spektrální křivka pro LED 6 500 K

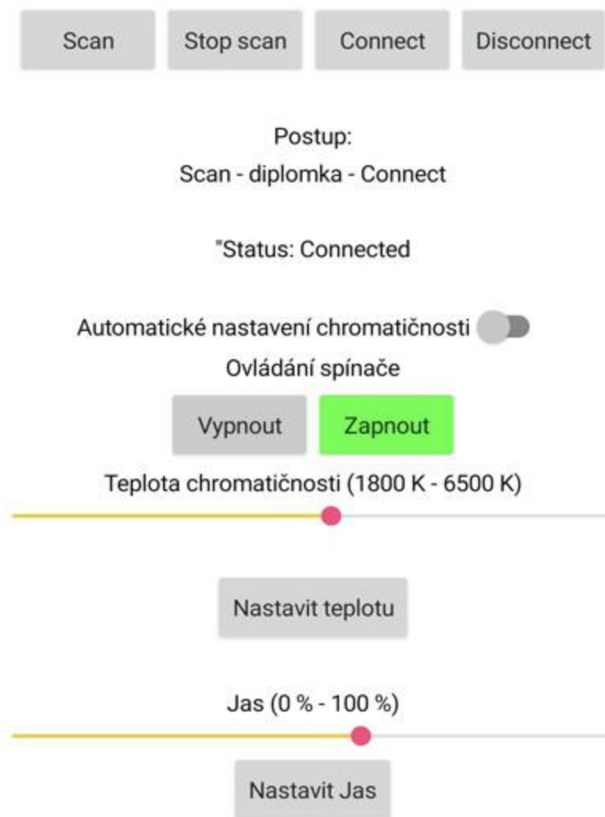
Na Obrázek 50 můžeme vidět grafickou závislost poměrné spektrální citlivosti na vlnové délce pro světelný zdroj 6 500 K. Maximum křivky je dosaženo v bodě $\lambda_{\max} = 448 \text{ nm}$. Náhradní teplota chromatičnosti dosahuje u tohoto světelného zdroje 6 536 K a index barevného podání dosahuje hodnoty 94,6.

7.2 Spotřeba elektrické energie

V režimu standby jsou hlavními odběrateli elektrické energie z baterií indikace napětí baterie a samotné Arduino Uno. Pokud indikace stavu baterie ukazuje úplný stav nabití, tzn., že svítí tři zelené LED diody, je odběr indikace 39,1 mA. Vývojová deska Arduino Uno odebírá 39,7 mA.

V provozním režimu je odběr indikace stavu baterií totožný, jako ve standby režimu. Arduino Uno tentokrát odebírá 56,5 mA. Pokud je rozsvícen pouze studeně bílý světelný zdroj, je jeho odběr 120 mA. Při použití čistě jen teple bílého světelného zdroje je tento odběr vyšší, a to 130 mA.

Pro názorný příklad měření spotřeby byla zvolena teplota chromatičnosti dle Obrázek 51, kdy pro jas 100 % obvodem protékal proud 120 mA a při nastavení jasu dle Obrázek 51 byl odběr snížen na 70 mA.



Obrázek 51: Aplikace Svitidlo – měření spotřeby elektrické energie

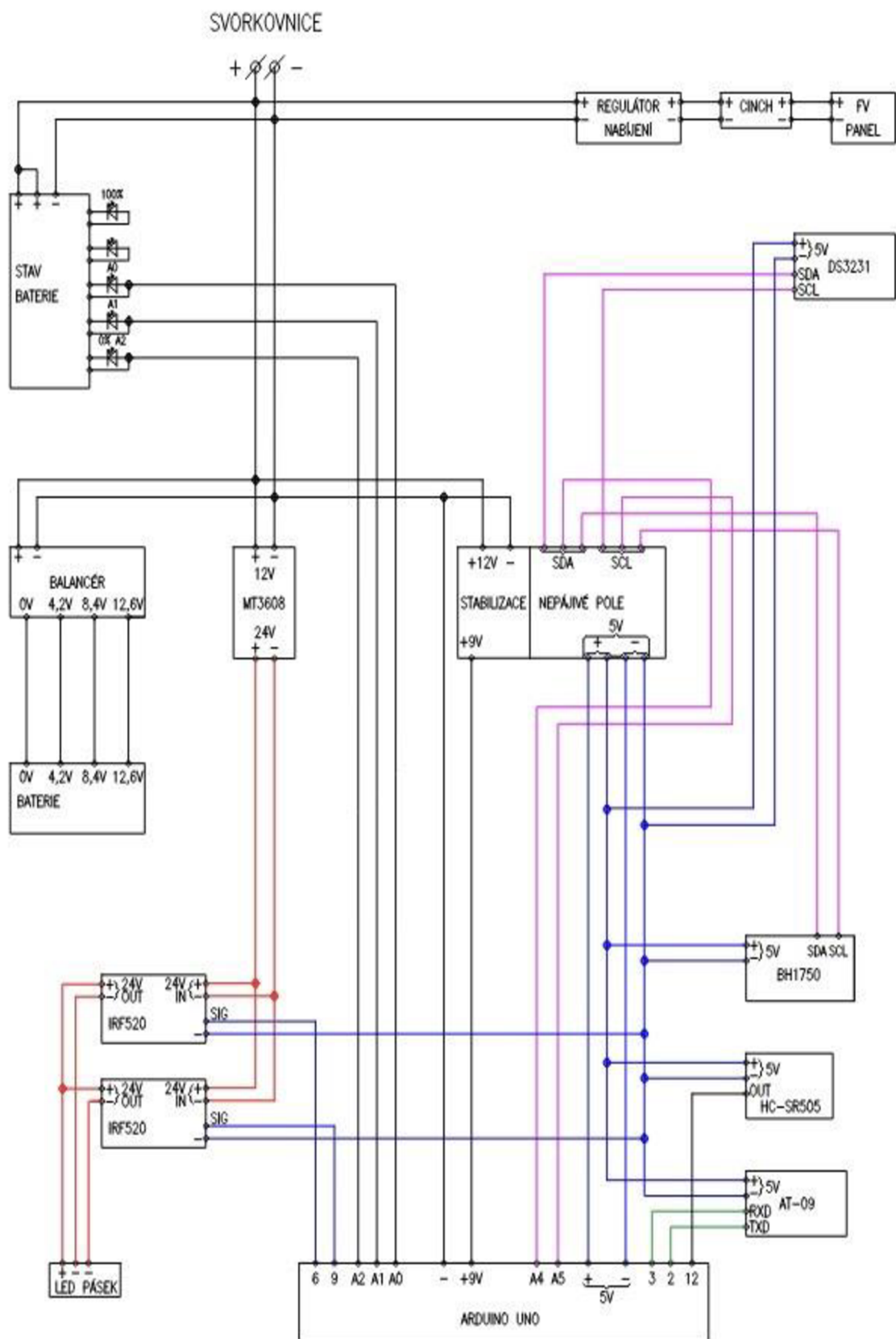
Měření probíhalo vždy pro celé větve napájené ze svorkovnice dle Obrázek 52, kde je uvedeno nové zapojení úspory energie systému řízené signalizačními LED diodami. To znamená, že spotřeba desky Arduino Uno byla měřena vždy i s periferiemi.

7.3 Solární napájení baterií

Při testovacím měření bylo napětí FV panelu naprázdno 14,61 V při intenzitě slunečního záření $821 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ dle [49]. Při nabíjení baterií bylo výstupní napětí FV panelu 2,84 V při dodávaném proudu 0,44 A. Napětí za napájecím modulem M397A bylo 12,31 V při nabíjecím proudu 0,12 A.

7.4 Napájení baterií z distribuční sítě

V případě nabíjení baterií z externího zdroje byl použit lineární stabilizátor napětí 12 V / 2 A. Dodávaný proud z tohoto stabilizátoru byl 0,26 A. Při stejném nastavení napájecího modulu M397A bylo jeho výstupní napětí 12,38 V při nabíjecím proudu 0,22 A.



Obrázek 52: Schéma zapojení solárního svítidla (AutoCAD) – po zdokonalení konstrukce

7.5 Fotodokumentace



Obrázek 53: Svítidlo – pohled zepředu se signalizací a PIR senzorem (vlevo) a pohled zezadu se soumrakovým senzorem a napájecím konektorem (vpravo)



Obrázek 54: Konstrukční prototyp svítidla

7.6 Měření doby provozu v automatickém režimu svícení

7.6.1 Další nutné zdokonalení konstrukce

Při posledním měření bylo zkoušeno, jak dlouho lze provozovat svítidlo v automatickém režimu svícení z plně nabitých baterií, přes snížení jasu na 50 % až po přechod do standby režimu. Po dvou hodinách svícení se světelný zdroj rozblíkal. Bylo zjištěno, že veškeré předchozí úvahy o signalizaci stavu baterie byly chybné. Tento druh zkoušky doposud prováděn nebyl, a bylo zjištěno, že se změnou napětí na bateriích se mění i hladiny napětí na signalizačních LED diodách v nepředvídatelných krocích, jak již napovědělo první přenastavení mezního stavu na 400 bitů, proto je v tomto okamžiku nebylo možné nadále používat pro řízení úspory energie systému. Občas hodnota napětí překročila i rozsah vstupních napětí na vstupních analogových pinech vývojové desky. Část zdrojového kódu byla zachována v zakomentované verzi pro další zkoumání. Řídící napětí na pinech A0 až A2 byly odpojeny z vývojové desky, na signalizaci však zůstaly zachovány. Z vnitřní strany plastové krabice bylo poznamenáno, kde byly zapojeny.

Nově bylo využito napětí jednoho bateriového článku z balancéru a připojeno na vstupní analogový pin A3. Zde byla provedena úvaha, že napětí plně nabitých použitých bateriových článků se pohybuje okolo hodnoty 4,1 V. Jejich doporučené minimální napětí se v online dostupných literaturách liší od 2,75 V do 3 V. Ochranný balancér nedovoluje články vybit pod hodnotu 2,5 V. Za nově zvolené hodnoty pro řízení úspory energie tedy byly zvoleny hladiny napětí 3,7 V a 3,3 V. Při jmenovité hodnotě napětí 3,7 V (757 bitů) se sníží jas svítidla na 50 % a při hladině 3,3 V (675 bitů) přejde zařízení do režimu standby. Tyto hodnoty byly zvoleny s rezervou pro delší životnost baterií.

Tato operace je reprezentována zdrojovým kódem:

```
unsigned long lastChangeTime = 0; // proměnná pro ukládání času poslední změny
unsigned long debounceDelay = 300000; // časové zpoždění v milisekundách (5 minut)
unsigned long currentTime = millis();
if (signalA3 <= 675) {
    if ((currentTime - lastChangeTime) >= debounceDelay) {
        impuls_z_wdt = 0;
        digitalWrite(LED_PIN_1, LOW);
        digitalWrite(LED_PIN_2, LOW);
        enterSleepMode(); // vstup do standby režimu
        return;
    }
} else if (signalA3 > 675 && signalA3 < 757) {
    if ((currentTime - lastChangeTime) >= debounceDelay) {
        actualBrightnessModifier = 2; // snížení jasu na 50 %
        lastChangeTime = currentTime;
    }
} else {
    if ((currentTime - lastChangeTime) >= debounceDelay) {
        actualBrightnessModifier = 1;
        lastChangeTime = currentTime;
    }
}
```

Z důvodu citlivého převodu napětí na hodnotu v bitech je zde použito zpoždění pět minut proto, aby při kolísání napětí okolo hodnot nastavených v podmínkách světelný zdroj neměnil skokově jas – neblikal.

7.6.2 Možná doba provozu

Při novém měřicím pokusu svítidlo udrželo stoprocentní jas po dobu tři hodin. Napětí vlivem zpoždění snížení jasu pokleslo na 11 V, kde byl předpoklad 11,1 V. Při sníženém jasu pak dokázalo svítit po dobu dalších pěti hodin. To odpovídá napětí baterií 9,7 V při přechodu do režimu standby, zase se zpožděním pěti minut a předpokladem 9,9 V.

Měření probíhalo při večerních a nočních hodinách, proto je zde nutno vzít v úvahu, že docházelo k přechodu ze studené bílé po teple bílou barvu světla, která má dle kapitoly 7.2 sice vyšší spotřebu elektrické energie, ale dle kapitoly 6.2 je v nočních hodinách snižován její jas. Celková doba provozu svítidla tedy bude vždy záležet na zvoleném režimu svícení a stavu nabití baterií.

7.7 Návrhy na vylepšení současného prototypu

7.7.1 Funkce chytrého svítidla – rekapitulace

Některé funkce chytrých svítidel byly zmíněny v kapitole 2. Lze je shrnout a rozšířit do:

- 1) Možnost dálkového ovládání pomocí chytrých zařízení a hlasových asistentů.
- 2) Možnost regulace jasu a barevného odstínu světelného zdroje.
- 3) Pomocí plánování a automatizace lze načasovat osvětlení a vytvářet barevné scény, které odpovídají různým situacím propojených s domácími systémy.
- 4) Použití detektoru pohybu nebo soumrakového senzoru pro úsporu energie.
- 5) Možnost vzdáleného monitorování spotřeby elektrické energie.
- 6) Noční režim snižující jas svítidel pro lepší spánek.
- 7) Integrace s alarmy a budíky, simulace přítomnosti.
- 8) Sledování životnosti světelného zdroje podle počtu cyklů sepnutí a času provozu.
- 9) Postupný náběh na požadované osvětlení a režimy úspory energie.

Jistým způsobem prototyp svítidla splňuje body 1, 2, 4, 6 a 9. Dle dalšího plánování využití lampy by se mohlo zdát vhodné doplnit funkci budíku či simulaci přítomnosti.

7.7.2 Hardwarová část

Nově použité řízení úspory energie umožňuje větší hloubku vybití baterií, než tomu bylo za použití signalizačních LED. Signalizační LED zůstaly zapojeny alespoň pro představu stavu baterií při začátku vybíjení, avšak za cenu poměrně vysokého odběru elektrické energie. Proto by bylo vhodné najít efektivnější způsob signalizace stavu baterie, který nebude tak náročný na proudový odběr a bude pro uživatele jednoznačný. Nabízí se možnost vrátit se k digitálnímu měřiči dle původního návrhu. S tím související je i použitý napájecí FV panel, který by bylo žádoucí vyměnit za výkonnější, se zachováním

stávající velikosti, či menším. Použití automatického sledování FV panelu Slunce by také zvýšilo efektivitu zařízení. Nabízí se možnost zvýšit kapacitu bateriového uložení doplněním dalších tří článků typu INR18650M29. Jak při výměně FV panelu, tak při zvýšení kapacity uložení bude vhodné zkontrolovat nastavení napájecího modulu M397A. Další žádoucí výměnou je světelný zdroj s jmenovitým napětím 12 V.

Při vybíjení bateriového uložení víme, že při přechodu do režimu standby je zhasnut světelný zdroj, spotřeba vývojové desky se sníží, ale zůstává aktivní celá část periférií připojených k Arduinu na jeho výstupu 5 V. Tento výstup není možno přímo nijak softwarově vypnout, ani deska není vybavena žádnou mechanickou součástkou, která by to umožnila. Nabízí se zde však možnost použití digitálního výstupu s PWM, který by opět přes modul s tranzistorem IRF520 spínal napětí 5 V a při přechodu do režimu standby by ho odpojil. Tím by se dosáhlo další úspory elektrické energie, než by byly baterie znovu nabity, aby zbytečně nedocházelo k odstavení napájení podpěťovou ochranou balancéru. Při tomto procesu se může stát, že balancér neobnoví dodávku napájení ani po vložení plně nabitých baterií, a je nutno připojit externí zdroj napájení, ať už FV panel nebo nabíječku.

Při pokračování vybíjení baterií v režimu standby po čase dojde k vybavení podpěťové ochrany balancéru. Když k tomu dojde, napětí v obvodu by mělo klesnout ideálně k 0 V. Přivedené napětí z jednoho článku baterie na vstup A3 však způsobí, že přes ochrannou diodu Arduina je napětí propuštěno zpět do obvodu, a dochází k dalšímu vybíjení baterie, i když měla být odstavena. Tuto nedokonalost lze odstranit použitím vhodné Zenerovy diody, která by měla průrazné napětí na hodnotě napětí odpovídající režimu standby, nebo o něco nižším. Tato dioda by napájela relé, které by tento signál na analogovém vstupu A3 přerušilo v případě poklesu napětí baterie.

Pro úsporu energie, spojenou s ochranou proti podpětí na bateriích, lze tedy doplnit kombinaci tranzistoru odpojovacího napájení periférií Arduina a relé, které by přerušilo napájení z baterie na analogový vstup A3, způsobující další vybíjení baterie i po vybavení podpěťové ochrany. Obě tyto napájení by však mohlo odpojovat pouze relé s více kontakty, což by usnadnilo proces zdokonalení konstrukce, spočívající v tom, že by nebylo nutné měnit zdrojový kód zařízení.

7.7.3 Softwarová část

Použitá komunikace Bluetooth byla nastavena na jednostrannou. Při nastavení na oboustrannou komunikaci zařízení bude spolehlivější a získá více možností využití. Uživatel by si nemusel pamatovat nastavené hodnoty – četl by je ze zařízení a umožnilo by to manuální ovládání pomocí rotačních enkodérů. V aplikaci by se tak mohla promítnout aktuální nastavená hodnota teploty chromatičnosti a jasu pomocí enkodérů.

8. ZÁVĚR

V první části diplomové práce byla vytvořena rešerše pojednávající o obecné světelné technice a o jejím vlivu vnímání lidského těla na světelné podněty. Byl uveden základní přehled pojmů ze světelné techniky, byl sepsán přehled vybraných dostupných integrativních svítidel, určených od veřejného osvětlení, přes domácí osvětlení až po přenosné osvětlení. Dále bylo pojednáno o nejnovějších poznatcích světelných zdrojů, vyvinutých v České republice, zahrnujících plnospektrální osvětlení a biodynamické osvětlení. Teoretická část práce byla zakončena uvedením přehledu součástí solárních napájecích systémů a určením solárního potenciálu pro Jihomoravský kraj.

V praktické části této práce byl proveden návrh, konstrukce a měření na vyrobeném prototypu. Zpočátku byly vybrány součástky, z kterých se teoreticky prototyp měl skládat. Bylo provedeno ověření tohoto návrhu a pokračovala stěžejní část práce, kde byl návrh několikrát zdokonalen a převeden do praktického provedení.

Vyrobené chytré solární svítidlo je ovládáno přes mobilní aplikaci, která uživateli umožňuje vybrat si dva režimy svícení. První režim je automatický, ve kterém je nastavována náhradní teplota chromatičnosti světelného zdroje podle denní doby uvedená v Tabulka 12 v kapitole 6.2. V tomto režimu lze zvolit funkci Ovládání spínače, Detektor pohybu, který rozsvěcí svítidlo na dobu 10 vteřin a Senzor osvětlení, který lze skrze aplikaci nastavit na aktivační hodnotu. Pokud je osvětlení vyšší, než je nastavené, aktivuje se standby režim. Během standby režimu se svítidlo na okamžik aktivuje, v intervalu osmi sekund, vyhodnotí hodnotu ze senzoru osvětlení a buďto rozsvítí světelný zdroj, nebo se vrátí do standby režimu. Dále je v automatickém režimu funkce Zrychlený mód, která zkracuje trvání jedné hodiny na dobu tří sekund za účelem prezentace změny náhradní teploty chromatičnosti během dne. Při každém rozsvícení světelného zdroje v automatickém režimu se jas zvyšuje z nulové hodnoty na hodnotu 100 % v intervalu dvou sekund. Druhý režim je manuální, ve kterém si uživatel může nastavit náhradní teplotu chromatičnosti dle vlastní potřeby i jas, bez funkce postupného zvyšování jasu. Detailní popis těchto dvou režimů je uveden v kapitole 6.

V kapitole 7 jsou uvedeny naměřené hodnoty prototypového svítidla. Jedná se především o údaje světelných veličin, kde jsou uvedeny vlastnosti světelného zdroje, energetických veličin a možné době provozu bez nabíjení baterií. Použitý světelný zdroj dle měření dosahuje udávaného rozsahu náhradních teplot chromatičnosti 1 800 K až 6 500 K s drobnou odchylkou, která je vždy vyšší než udávané hodnoty výrobcem. Index podání barev se pohybuje okolo hodnoty 95. Příkon svítidla je při stoprocentním jasu přibližně 2,6 W a při plně nabitých bateriích dokáže svítit až 8 hodin, než přejde do režimu standby. Tato doba se může lišit dle zvoleného režimu svícení.

Funkce svítidla byly voleny dle preferencí autora. Účelem však bylo prozkoumat co nejvíce možností, které se na prototypu dají nastavit. Předložený prototyp je třeba dále

testovat, pro odladění skrytých nedokonalostí a podle dalšího úmyslu jeho využití lze přemýšlet o jeho úpravách a přidání dalších funkcí.

Pro prodloužení doby svícení svítidla se nabízí možnost zvýšit kapacitu bateriového uložení připojením dalších tří baterií typu 18650 s kapacitou 2 900 mAh. Pro urychlení nabíjení tohoto uložení bude nutné vyměnit fotovoltaický panel za výkonnější. V obou případech změny bude nutné zkontrolovat nastavení regulátoru nabíjení. Poslední vylepšení prototypu, v hardwarové oblasti, je nalezení úspornějšího řešení signalizace stavu baterií, kterým bude opět možno řídit spotřebu uložené energie. Po přechodu do standby režimu se nabízí možnost odpojovat periferie Arduina, aby nedocházelo ke zbytečnému odběru energie, který bude mít za důsledek zafungování podpěťové ochrany ochranného balancéru baterií. V případě použití tohoto vylepšení by odběr svítidla zůstal minimální, závislý pouze na odběru vývojové desky, signalizaci regulátoru nabití a signalizaci stavu baterií.

LITERATURA

- [1] *Světlo*. Online. 2009, roč. 2009, č. 01. 2009. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/zaklady-svetelne-techniky-3--15576>. [cit. 2023-10-18].
- [2] SOKANSKÝ, Karel; NOVÁK, Tomáš; BÁLSKÝ, Marek; BLÁHA, Zdeněk; CARBOL, Zbyněk et al. *Světelná technika*. Online. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/dokument/CVUT-6-Svetelna.pdf>. [cit. 2023-10-18].
- [3] *Viditelné spektrum*. Online. In: Honzovo rybaření. 2016. Dostupné z: <https://honzovorybareni.cz/dravci/barevne-nastrahy-skutecne-na-barve-tak-zalezi/>. [cit. 2023-10-18].
- [4] *Smart Home: Definition, How They Work, Pros and Cons*. Online. HAYES, Adam. Investopedia. 2023. Dostupné z: <https://www.investopedia.com/terms/s/smart-home.asp>. [cit. 2023-11-27].
- [5] *Inteligentní osvětlení*. Online. Loxone. Dostupné z: [https://www.loxone.com/cscz/produkty/osvetleni/?utm_source=google&utm_medium=paid&utm_campaign=\(campaignid\)&gad_source=1](https://www.loxone.com/cscz/produkty/osvetleni/?utm_source=google&utm_medium=paid&utm_campaign=(campaignid)&gad_source=1). [cit. 2023-11-27].
- [6] GONG, Taylor. *Solar street light price and component cost breakdown*. Online. ZGSM. Dostupné z: <https://www.zgsm-china.com/blog/solar-street-light-price-and-component-cost-breakdown.html>. [cit. 2023-11-28].
- [7] *Series PV Split Type Solar Street Led Light*. Online. In: ZGSM. Dostupné z: <https://www.zgsm-china.com/wp-content/uploads/2021/12/2-26.jpg.webp>. [cit. 2023-11-28].
- [8] *Series PV5 All in One Solar Street Lamp*. Online. In: ZGSM. Dostupné z: <https://www.zgsm-china.com/wp-content/uploads/2023/09/All-in-one-solar-street-lamp.jpg.webp>. [cit. 2023-11-28].
- [9] *Smart solar street light – built-in system or wireless control*. Online. GONG, Taylor. ZGSM. Dostupné z: <https://www.zgsm-china.com/smart-lighting-system/smart-solar-street-light-built-in-system-or-wireless-control.html>. [cit. 2023-11-29].
- [10] ATELIER SVĚTELNÉ TECHNIKY S.R.O. ČSN EN 13201-2, *Osvětlení pozemních komunikací - Část 2: Požadavky*. 2019.

- [11] *Co to je IoT?* Online. IoT PORT. 2020. Dostupné z: https://www.iotport.cz/iot-novinky/ostatni-clanky-o-iot/co-to-je-iot?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiA67CrBhC1ARIsACKAa8RUxFO_qvreib5mddD6YUZXDbfu06qrN9hywQ64yc9ulkeQCVjmu0QaAjyvEALw_wcB. [cit. 2023-12-03].
- [12] *Series PV5 All in One Solar Street Lamp*. Online. ZGSM. Dostupné z: <https://www.zgsm-china.com/led-products/series-pv5-all-in-one-solar-street-lamp>. [cit. 2023-12-04].
- [13] *Series PV4 Integrated Solar Street Light*. Online. ZGSM. Dostupné z: <https://www.zgsm-china.com/led-products/series-pv4-integrated-solar-street-light>. [cit. 2023-12-04].
- [14] *Series N Solar Powered Street Lights*. Online. ZGSM. Dostupné z: <https://www.zgsm-china.com/led-products/series-n-solar-powered-street-lights>. [cit. 2023-12-04].
- [15] *Series PV Split Type Solar Street Led Light*. Online. ZGSM. Dostupné z: <https://www.zgsm-china.com/led-products/series-pv-split-type-solar-street-led-light>. [cit. 2023-12-04].
- [16] *What Are SMART Solar Street Lights*. Online. LEADSUN. Dostupné z: <https://leadsun.com.au/what-are-smart-solar-street-lights/>. [cit. 2023-12-05].
- [17] *ST43 All In One Smart Solar Street Light 200LM/W*. Online. AGC Lighting. Dostupné z: <https://www.agclighting.com/area-sports-lights/st43-solar-street-light-200lm-w.html>. [cit. 2023-12-06].
- [18] *Smart Solar Light Street Control System Ip65 Die Cast Aluminum All In One SR-AL1*. Online. GermanLite. Dostupné z: <https://www.germanlite.com/smart-solar-light-street-control-system-ip65-die-cast-aluminum-all-in-one-sr-al1-product/>. [cit. 2023-12-06].
- [19] *What Is A Philips Hue*. Online. Citizenside.com. 2023. Dostupné z: <https://citizenside.com/technology/what-is-a-philips-hue/>. [cit. 2023-12-29].
- [20] *Jak funguje Philips Hue*. Online. PHILIPS hue. Dostupné z: <https://www.philips-hue.com/cs-cz/explore-hue/how-it-works>. [cit. 2023-12-29].
- [21] *Calex Smart Outdoor solární lampa, senzor, RGBW*. Online. Světla24.cz. Dostupné z: https://www.svetla24.cz/p/calex-smart-outdoor-solarni-lampa-senzor-rgbw-10011414.html?lw_om_view=recotop&utm_source=google&utm_medium

- [=cpc&utm_campaign=SHOPPING Smart-Home&utm_content=Smart-Home&gad_source=1&gclid=CjwKCAiAnL-sBhBnEiwAJRGigh5TGpa4YfCuICqUMCEwrdKDOyhj0iz9HzfdEHXy2sk7MafCXc4mhoCZ-IQAvD BwE&et uk=67e70cf25d894c2ea556b53f60c330eb&et_gk=ZDE5NGEwZjA4MzU3NGYxMDg1NGEzODkwNjI5Y2RiOWQIN0MyNi4wMS4yMDI0KzIwJTNBMTYIM0E0Nw. \[cit. 2023-12-30\].](#)
- [22] *Venkovní svítidlo IMMAX NEO LITE BUBBLES, solární, 56 cm (07906L) černé.* Online. Datart. Dostupné z: https://www.datart.cz/venkovni-svitidlo-immax-neo-lite-bubbles-solarni-56-cm-07906L-cerne.html?gad_source=1&gclid=CjwKCAiAnL-sBhBnEiwAJRGigg5bwJz30MzOHZliQv3UTcMvMhJzi PLb9-9R9e-6nTY_of2_g5QMB0CYdkQAvD BwE#moreDescription. [cit. 2023-12-30].
- [23] *Immax NEO LITE BUBBLES smart solar luminaire.* Online. Immax. Dostupné z: <https://www.immax.eu/immax-neo-lite-bubbles-smart-solar-luminaire-large-column-56cm-cw-ww-rgb-ip54-bt-tuya-2w-p15492/>. [cit. 2023-12-30].
- [24] *SOLÁRNÍ LAMPIČKA LUCI CONNECT.* Online. Smíchoff. Dostupné z: <https://www.smichoffer.cz/turistika-a-kemping/solarni-lampicka-luci-connect.html>. [cit. 2023-12-30].
- [25] *Eoutdoor.* Online. Mpowerd LUCI CONNECT. Dostupné z: https://www.e-outdoor.cz/mpowerd-luci-connect/?gad_source=1&gclid=CjwKCAiAnL-sBhBnEiwAJRGigrUYM71dOaNtvabkMWLezzBEH6-_g69cT1DpKUeN3PipDchez7HmhoCQr8QAvD BwE. [cit. 2023-12-30].
- [26] *ECOFLOW 600545 LED campingové osvětlení 400 lm napájeno akumulátorem.* Online. Puhy.cz. Dostupné z: https://www.puhy.cz/ecoflow-600545-led-campingove-osvetleni-400-lm-napajeno-akumulatorem-1615901.html?gad_source=1&gclid=CjwKCAiAnL-sBhBnEiwAJRGigsITKJuq2yTuLikY_gphfrHtFmJC8nubTV_S-rxYNTS3MjIvsAbeRRoCfr8QAvD BwE. [cit. 2023-12-30].
- [27] *VLIV SVĚTLA NA ČLOVĚKA: 1. DÍL – OBJEV GANGLIOVÝCH BUNĚK.* Online. RUML, Filip. Svítím pro tebe. 2021. Dostupné z: <https://svitimprotebe.cz/objev-gangliovych-bunek/>. [cit. 2024-01-01].
- [28] *VLIV SVĚTLA NA ČLOVĚKA: 2. DÍL – LIDSKÉ OKO.* Online. RUML, Filip. Svítím pro tebe. 2021. Dostupné z: <https://svitimprotebe.cz/lidske-oko/>. [cit. 2024-01-01].

- [29] *VLIV SVĚTLA NA ČLOVĚKA: 3. DÍL – NEVIZUÁLNÍ SYSTÉM VNÍMÁNÍ SVĚTLA*. Online. RUML, Filip. Svítím pro tebe. 2021. Dostupné z: <https://svitimprotebe.cz/nevizualni-system/>. [cit. 2024-01-01].
- [30] *VLIV SVĚTLA NA ČLOVĚKA: 4. DÍL – VÝZNAM CIRKADIÁNNÍCH RYTMŮ U ČLOVĚKA*. Online. RUML, Filip. Svítím pro tebe. 2021. Dostupné z: <https://svitimprotebe.cz/vyznam-rytmu/>. [cit. 2024-01-01].
- [31] *VLIV SVĚTLA NA ČLOVĚKA: 5. DÍL – CITLIVOST CIRKADIÁNNÍHO SYSTÉMU*. Online. RUML, Filip. Svítím pro tebe. 2021. Dostupné z: <https://svitimprotebe.cz/citlivost/>. [cit. 2024-01-01].
- [32] *PARAMETRY ZDRAVÉHO SVÍTIDLA: 2. DÍL – PARAMETR A-OPIC LUX*. Online. RUML, Filip. Svítím pro tebe. 2022. Dostupné z: <https://svitimprotebe.cz/alfa-opic-lux/>. [cit. 2024-01-03].
- [33] *PARAMETRY ZDRAVÉHO SVÍTIDLA: 3. DÍL – METODA A-OSVĚTLENÍ*. Online. RUML, Filip. Svítím pro tebe. 2022. Dostupné z: <https://svitimprotebe.cz/alfa-opic-lux/>. [cit. 2024-01-03].
- [34] *Lighting Calculations in the LED Era*. Online. Mouser electronics. Dostupné z: https://eu.mouser.com/applications/lighting_calculations/. [cit. 2024-01-03].
- [35] *Prokognitivní osvětlení Spectrasol*. Online. Spectrasol biodynamic human solutions. Dostupné z: <https://www.spectrasol.cz/produkty/technologie/>. [cit. 2024-01-06].
- [36] *Proč Spectrasol*. Online. Spectrasol biodynamic human solutions. Dostupné z: <https://www.spectrasol.cz/>. [cit. 2024-01-06].
- [37] FUKSA, Antonín. *Biodynamické osvětlení*. Online. DentaSun. Dostupné z: <https://www.dentasun.com/biodynamicke-osvetleni/>. [cit. 2024-01-06].
- [38] *Co je biodynamické osvětlení?* Online. Lampax. Dostupné z: <https://www.lampax.cz/biodynamicke-osvetleni/>. [cit. 2024-01-06].
- [39] *Vitae*. Online. Vitae. Dostupné z: <https://www.vitaelight.com/>. [cit. 2024-01-06].
- [40] MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Online. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN isbn978-80-01-04937-2. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595e881fa66875530f33e8a/cvut-2-oze.pdf>. [cit. 2024-04-21].
- [41] CHMEL, Ladislav a HAMERNÍK, Ivo. *Fotovoltaika, fototermika*. Online. Brno, 2016. ISBN 978-80-88058-02-1. Dostupné z: <https://publi.cz/books/91/Impresum.html>. [cit. 2024-04-21].

- [42] *Střídače pro domácí fotovoltaiku I. – funkce a parametry*. Online. Tzbinfo. 2022. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/24668-stridace-pro-domaci-fotovoltaiku-i-funkce-a-parametry>. [cit. 2024-04-21].
- [43] *LITHIUM IRON PHOSPHATE BATTERY (LFP)*. Online. CEVA LOGISTICS. Dostupné z: <https://www.cevalogistics.com/en/glossary/lithium-iron-phosphate-battery-lfp>. [cit. 2024-04-23].
- [44] *Studie Columbus: Česká republika má pro fotovoltaiku potenciál*. Online. Columbus. 2022. Dostupné z: <https://columbusenergy.cz/blog/studie-columbus-ceska-republika-ma-pro-fotovoltaiku-potencial/>. [cit. 2024-04-26].
- [45] *Global Photovoltaic Power Potential by Country*. Online. GLOBAL SOLAR ATLAS. 2020. Dostupné z: <https://globalsolaratlas.info/global-pv-potential-study>. [cit. 2024-04-26].
- [46] Online. GLOBAL SOLAR ATLAS. Dostupné z: <https://globalsolaratlas.info/detail?c=49.132993,16.615615,8&r=CZE:CZE.2.1>. [cit. 2024-04-26].
- [47] *RGB+CCT pásek 34W/m, PROFI, 216LED, 2835, RGB +1800/6500K, CRI>95, 5let záruka*. Online. KPLED. Dostupné z: <https://eshop.kpled.cz/barevne-led-pasky-rgb-rgbw-rgb-cct/rgb-cct-pasek-34w-m-profi-216led-2835-rgb-1800-6500k-cri-95-5let-zaruka>. [cit. 2024-04-28].
- [48] *Solární panel 12V 6W až 500mA s DC konektorem*. Online. DRÁTEK.CZ. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/121922-solarni-panel-12v-6w-az-500ma-s-dc-konektorem.html>. [cit. 2024-04-28].
- [49] KALINA, Jiří. *Podrobné údaje o slunečním záření*. Online. Dostupné z: <http://meteo-jirkalina.com/wx38.php>. [cit. 2024-05-17].

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

Monochrom	Monochromatické
SI	Système International (Mezinárodní soustava jednotek)
Kap	Kapitola
DALI	Digital Addressable Lightning Interface
MPPT	Maximum Power Point Tracking
BMS	Battery Management System
ipRGCs	intrinsically photosensitive Retinal Canglion Cells
SCN	Suprachiasmatic nukleus
FV	Fotovoltaický
VRB	Vanadium redox battery
GHI	Global Horizontal Irradiance

Symboly:

λ	Vlnová délka	(nm)
λ_m	Základní vlnová délka	(nm)
T_c	Náhradní teplota chromatičnosti	(K)
R_a	Index barevného podání	(-)
f	Frekvence	(Hz)
Φ	Světelný tok	(lm)
Φ_e	Zářivý tok	(W)
I	Svítivost	(cd)
I_e	Zářivost	(W · sr ⁻¹)
c	Rychlost světla	(m · s ⁻¹)
c_0	Rychlost světla ve vakuu	(m · s ⁻¹)
p	Tlak	(Pa)
t	Teplota	(°C)
Φ	Relativní vlhkost vzduchu	(%)
N	Index lomu	(-)
$K(\lambda)$	Světelný účinek monochrom. záření	(lm · W ⁻¹)
K_m	Maximální hodnota $K(\lambda)$	(lm · W ⁻¹)
$V(\lambda)$	Světelná účinnost monochrom. záření	(-)
L_a	Adaptační jas	(cd · m ⁻²)
r	Poloměr	(m)
d	Průměr	(m)
l	Vzdálenost	(m)
A	Plocha	(m ²)
Ω	Prostorový úhel	(sr)

β, γ	Úhel	(°)
E	Osvětlenost	(lx)
L	Jas	(cd · m ⁻²)
M	Světlení	(lm · m ⁻²)
P_1	Příkon	(W)
P	Výkon	(W)
η_P	Měrný výkon	(lm · W ⁻¹)
t_{ziv}	Životnost	(h)
K	Kapacita	(Ah)
E_α	Osvětlenost fotoreceptoru	(α -opic lux)
I	Elektrický proud	(A)
R	Elektrický odpor	(Ω)
J	Proudová hustota	(A · m ⁻²)
U	Elektrická napětí	(V)
s	Střída	(-)

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Aplikace Svitidlo.apk je uložena na přiloženém CD.

Příloha B – Zdrojový kód Svitidlo.ino je uložen na přiloženém CD.