



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

MĚŘENÍ FOTOMETRICKÝCH PARAMETRŮ SVĚTELNÝCH ZDROJŮ PRO INTERAKTIVNÍ PANEL

MEASUREMENT OF PHOTOMETRIC PARAMETERS OF LIGHT SOURCES FOR INTERACTIVE BOARD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Richard Vágner

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Škoda, Ph.D.

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**
Ústav elektroenergetiky

Student: Richard Vágner

ID: 186223

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Měření fotometrických parametrů světelných zdrojů pro interaktivní panel

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vypracování přehledu používaných fotometrických parametrů světelných zdrojů a metodik jejich měření
2. Měření fotometrických parametrů předložených světelných zdrojů
3. Návrh karet s údaji pro interaktivní panel

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 27.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Jan Škoda, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá měřením fotometrických parametrů různých světelných zdrojů pro interaktivní panel nacházející se ve Světelné laboratoři VUT FEKT. V práci je popsán postup měření a zpracování fotometrických parametrů a elektrických parametrů světelných zdrojů (žárovky, halogenové žárovky, lineární zářivky, kompaktní zářivky a LED zdroje). Dále je v práci uveden způsob zpracování návrhu karet, které budou obsahovat tyto zmíněné parametry.

Klíčová slova

světelné zdroje; osvětlování; světelná technika; žárovky; zářivky; LED; fotometrie; měření

Abstract

This bachelor thesis deals with measurement of various photometric parameters of light sources designated for interactive board located in the Laboratory of Light VUT FEKT. There is described procedure and processing of photometric and electrical parameters of light sources (incandescent light bulbs, halogen lamps, compact fluorescent lamps, fluorescent tubes and LED lamps). Also there is presented processing method of designing cards that will contain mentioned parameters.

Keywords

light sources; illumination; lighting; light; light bulbs; fluorescent lamps; LED; photometrics; measurement

Bibliografická citace:

VÁGNER, Richard. Měření fotometrických parametrů světelných zdrojů pro interaktivní panel [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119169>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Jan Škoda.

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Škodovi Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

OBSAH

Seznam tabulek.....	10
Seznam symbolů, veličin a zkratek.....	11
1 Úvod.....	12
2 Fotometrie.....	13
2.1 Fotometrické veličiny	13
2.1.1 Světelný tok.....	13
2.1.2 Svítivost.....	14
2.1.3 Teplota chromatičnosti.....	15
2.1.4 Všeobecný index podání barev	18
2.1.5 Měrný světelný výkon	18
2.2 Elektrické veličiny	19
2.2.1 Účinník.....	19
2.2.2 Skutečný účinník.....	19
3 Světelné zdroje	20
3.1 Teplotní světelné zdroje	21
3.1.1 Obyčejné žárovky.....	21
3.1.2 Halogenové žárovky.....	22
3.2 Výbojové světelné zdroje.....	23
3.2.1 Lineární zářivky.....	23
3.2.2 Kompaktní zářivky	24
3.3 Elektroluminiscenční světelné zdroje	26
3.3.1 Světelné diody (LED)	26
4 Metodiky měření fotometrických veličin	29
4.1 Měřící přístroje.....	29
4.1.1 Spektroradiometry.....	31
4.1.2 Luxmetry.....	31
4.2 Měření světelného toku na kulovém integrátoru.....	32
4.3 Měření křivek svítivosti na goniofotometru	33
4.4 Měření křížových charakteristik.....	36
5 Praktická část	37
5.1 Měření na kulovém integrátoru	37
5.1.1 Schéma zapojení.....	37
5.1.2 Korekce	38
5.1.3 Měření světelného toku.....	39
5.1.4 Zpracování měření.....	40
5.1.5 Seznam použitých přístrojů a zařízení	47
5.1.6 Laboratorní podmínky	47
5.2 Měření na goniofotometru	47
5.2.1 Schéma zapojení.....	47
5.2.2 Postup měření čar svítivosti	49
5.2.3 Zpracování měření.....	50

5.2.4	Seznam použitých přístrojů a zařízení	52
5.2.5	Laboratorní podmínky	52
5.3	Měření křížových charakteristik.....	52
5.3.1	Schéma zapojení.....	53
5.3.2	Postup měření	53
5.3.3	Zpracování měření.....	54
5.3.4	Seznam použitých přístrojů a zařízení	58
5.3.5	Laboratorní podmínky	58
5.4	Návrh a zpracování karet s naměřenými parametry	59
5.4.1	Inkscape.....	59
5.4.2	Popis rozložení karty	59
6	Závěr.....	62
6.1	Přínos práce	62
	Citovaná literatura.....	63
	Seznam příloh.....	66

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Pro výpočet prostorového úhlu, pod nímž je z bodu P vidět plocha A [6].....	14
Obr. 2.2: Teplota chromatičnosti [4]	15
Obr. 2.3: Náčrt trojúhelníku barev v rovině $X + Y + Z = 1$ kolorimetrického prostoru XYZ [7]	15
Obr. 2.4: Diagram chromatičnosti mezinárodní kolorimetrické soustavy XYZ v pravoúhlých souřadnicích x, y (CIE 1931) [7].....	16
Obr. 2.5: Spektrální průběhy kolorimetrických koeficientů trichromatické soustavy XYZ [7]	17
Obr. 2.6: Měrné výkony světelných zdrojů v současné době [9]	18
Obr. 2.7: Složky zdánlivého výkonu pro odběr s nelineární součástí [10]	19
Obr. 3.1: Základní rozdělení elektrických světelných zdrojů [2], upraveno autorem	20
Obr. 3.2: Konstrukce obyčejné žárovky [11]	21
Obr. 3.3: Konstrukce halogenové žárovky [13]	22
Obr. 3.4: Konstrukce lineární zářivky [14].....	23
Obr. 3.5: Zapojení lineární zářivky s indukčním předřadníkem a doutnavkovým startérem [15].....	24
Obr. 3.6: Konstrukce zářivky se zabudovaným doutnavkovým startérem a patičí G24-d [16]	25
Obr. 3.7: Základní konstrukce světelné diody se dvěma krystaly [17], upraveno autorem .	27
Obr. 3.8: Vyzařované spektrum vybraných barevných LED [17]	28
Obr. 4.1: Průběhy poměrné spektrální citlivosti polovodičových fotočlánků v porovnání s poměrnou spektrální citlivostí $V(\lambda)$ normalizovaného pozorovatele [19].....	30
Obr. 4.2: Spektrometr JETI specbos 1211UV [20]	31
Obr. 4.3: Luxmetr RadioLux 111 [4]	31
Obr. 4.4 Náčrt rozložení kulového integrátoru [21]	32
Obr. 4.5: Křivky svítivosti v rovinách v systému $C-\gamma$ [22].....	34
Obr. 4.6: Prostorové vyznačení svítivosti s izoluxou na $C-\gamma$ polorovině [23]	34
Obr. 4.7: Náčrt konstrukce goniofotometru s pevným SZ a otočným fotometrem [21]	35
Obr. 5.1: Schéma měřící soustavy, zdroj: autor	37
Obr. 5.2: Průběh korekce zdroje č.3 pro viditelné spektrum, zdroj: autor	39
Obr. 5.3: Náběh světelného toku do ustálení na nominální hodnotu, zdroj: autor.....	39
Obr. 5.4: Změřené světelné spektrum světelného zdroje č.1, zdroj: autor	45
Obr. 5.5: Zpracovaný diagram chromatičnosti světelného zdroje č.1, zdroj: autor	45
Obr. 5.6: Změřený náběh světelného toku světelného zdroje č.1, zdroj: autor	46
Obr. 5.7: Změřený průběh korekce světelného zdroje č.1, zdroj: autor	46
Obr. 5.8: Blokové schéma zapojení goniofotometru, zdroj: autor.....	48
Obr. 5.9: MatLab skript pro zobrazení 3D svítivosti SZ, zdroj: autor.....	50
Obr. 5.10: 3D graf svítivosti světelného zdroje č.1, zdroj: autor	51
Obr. 5.11: Schéma zapojení pracoviště pro měření křížových charakteristik, zdroj: autor .	53

Obr. 5.12: Křížové charakteristiky zdroje č.1, zdroj: autor	57
Obr. 5.13: Průběh světelného toku zdroje č.1, zdroj: autor	57
Obr. 5.14: Grafický návrh přední strany karty měřeného zdroje č. 1, zdroj: autor	60
Obr. 5.15: Grafický návrh zadní strany karty měřeného zdroje č. 1, zdroj: autor	61

Seznam tabulek

Tabulka 1: Soupis měřených světelných zdrojů.....	42
Tabulka 2: Změřené a vypočtené hodnoty fotometrických a elektrických parametrů světelných zdrojů	43
Tabulka 3: Seznam použitých přístrojů a zařízení	47
Tabulka 4: Seznam použitých přístrojů a zařízení	52
Tabulka 5: Změřené a vypočtené hodnoty křížových charakteristik zdroje č.1.....	55
Tabulka 6: Seznam použitých přístrojů a zařízení	58

Seznam symbolů, veličin a zkratek

Symboly	Význam	Značka jednotky
λ	Vlnová délka	m
Φ	Světelný tok	lm
I	Svítivost	cd
Ω	Prostorový úhel	sr
A	Plocha	m ²
r, l	Poloměr, Vzdálenost	m
π	pí	-
β	Úhel mezi normálem a paprskem světla	°
N_{dA}	Normála pro plochu A	-
f	Frekvence	Hz
T_c	Teplota chromatičnosti	K
T_N	Náhradní teplota chromatičnosti	K
R_a	Všeobecný index podání barev	-
M_z	Měrný výkon	lm/W
P	Činný výkon	W
$\cos\varphi$	Účinník	-
PF	Power factor (skutečný účinník)	-
S	Zdánlivý výkon	VA
Q	Jalový výkon	VA _r
η	Elektrická účinnost	-
L	Jas	cd/m ²
X, Y, Z	Trichromatické složky	-
x, y, z	Trichromatické souřadnice	-
D	Průměr kulového integrátoru	M
$u'v'$	Trichromatické souřadnice	-
D_{uv}	Vzdálenost souřadnice od křivky tep. zářičů	-
Zkratky	Význam	
ČSN	Česká technická norma	
CIE	Mezinárodní komise pro osvětlování (Commission internationale de l'éclairage)	
LED	Světelná dioda, (Light Emiting Diode)	
SI	Mezinárodní systém jednotek, (Le Système International d'Unités)	
UV	Ultrafialová (Ultra violet)	
PC	Počítač (Personal Computer)	

1 Úvod

Světlo je pro člověka především prostředkem k přenosu a získání informací o prostředí, které ho obklopuje. Dnes se člověk pohybuje v průměru 90 % svého života v krytých prostorech s umělým osvětlením. Proto v životním prostředí člověka je tento způsob osvětlení stále významnější, vzhledem k měnícímu se životnímu stylu.

Hlavní cíl této práce je podpořit výuku o umělém osvětlení. Její náplň je přesně změřit fotometrické a elektrické parametry různých světelných zdrojů pro interaktivní panel v laboratoři světelné techniky a následné zpracování těchto dat do formy přehledné a maximálně informativní karty. Výsledný produkt bude k dispozici u každého světelného zdroje zvlášť a upraven tak, aby vyhovoval podmínkám laboratoře.

Práce je rozdělena na šest kapitol, ve kterých je uvedeno vše podstatné k problematice tohoto tématu.

V kapitole 2 jsou charakterizovány základní fotometrické a elektrické parametry, které budou změřeny na vybraných světelných zdrojích.

Kapitola 3 popisuje jednotlivé skupiny vybraných světelných zdrojů. Uvádí se zde jejich princip, fotometrické a elektrické vlastnosti, užití v praxi, a v neposlední řadě jejich přednosti a nevýhody.

V kapitole 4 je popsán princip funkcí přístrojů, zařízení a hlavně metodik, na kterých probíhalo měření v laboratoři světelné techniky.

V kapitole 5 je popsán postup měření na jednotlivých přístrojích v laboratoři světelné techniky. Na konci této kapitoly bude také uveden způsob zpracování naměřených dat do výsledného produktu.

Poslední kapitola číslo 6 hodnotí zpracování měření a výsledný produkt práce.

2 Fotometrie

Je oblast optiky popisující světlo a jeho účinky na lidské oko. [1] Fotometrie se zabývá pouze viditelnou částí elektromagnetického záření, čemuž odpovídá rozmezí vlnových délek 380–780 nm. Takové vlnové délky jsou schopné přímo vyvolat zrakový vjem či počitek. Přesné meze spektrálního rozsahu viditelného záření nelze pevně stanovit, z důvodu závislosti světelného toku dopadajícího na sítnici oka a na citlivosti oka samotném, jež má každý pozorovatel jiný. [2]

2.1 Fotometrické veličiny

Jsou to veličiny, které kvantitativně popisují vlastnosti zdrojů světla, přenos světla prostorem a děje spojené s dopadem světla na předměty.

Fotometrické veličiny se dělí na integrální a spektrální. Integrální veličiny charakterizují celkový vliv celého rozsahu viditelného spektra. Spektrální veličiny popisují vliv viditelného světla na určené vlnové délce, která je obecně označena ve spodním indexu symbolem λ . [3]

Z těchto veličin zde budou zmíněny ty, které budou poté změřeny nebo spočteny.

2.1.1 Světelný tok

Je to základní veličina ve světelné technice, která udává množství světelné energie, kterou vyzáří zdroj světla do okolí. [4] Značí se Φ a jeho jednotkou je lumen (lm), což lze popsat v základních jednotkách soustavy SI jako kandelasteradián (cd.sr). Tento vztah je tedy dán součinem svítivosti I a prostorovým úhlem $d\Omega$. [5]

$$d\Phi = I \cdot d\Omega \quad (2.1)$$

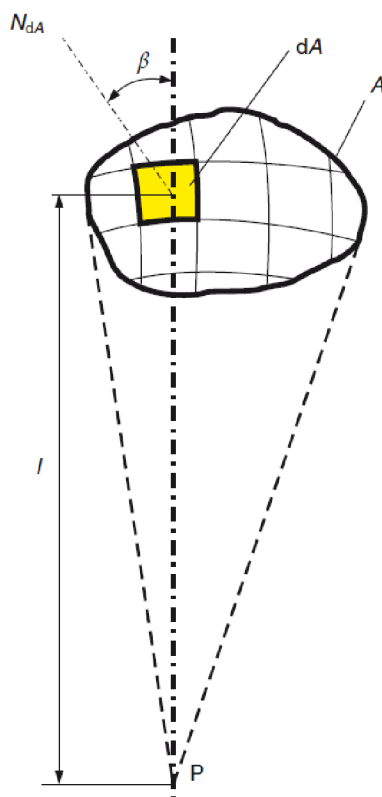
Šíření světelného toku v prostoru je dáno konstrukcí světelných zdrojů, svítidel a také geometrického uspořádání celého prostoru. Svou roli samozřejmě hrají i spektrální vlastnosti materiálů podílejících se na rozšiřování světelného toku. [5]

2.1.1.1 Prostorový úhel

Prostorový úhel Ω je důležitá geometrická veličina používaná ve fotometrii. Je to část prostoru definovaná plochou obecného kuželu, která tvoří plochu A na kouli o poloměru r . Je definován tímto vztahem:

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (2.2)$$

Tato veličina získává maximální hodnoty pro plochu A rovnou povrchu celé koule $A = 4\pi r^2$, z čehož vyplývá, že $\Omega_{max} = 4\pi$. [2]



Obr. 2.1: Pro výpočet prostorového úhlu, pod nímž je z bodu P vidět plocha A [6]

Pro definování prostorového úhlu na elementární ploše dA , která je pozorovatelná ze vzdálenosti l od bodu P (Obr. 2.1), je $d\Omega$ rovno:

$$d\Omega = \frac{dA \cdot \cos\beta}{l^2} \quad (2.3)$$

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

2.1.2 Svítivost

Svítivost I je základní fotometrická veličina popisující distribuci světla do prostoru. Její jednotkou je kandela (cd), která patří do soustavy SI a je definována jako svítivost zdroje světla, který vyzařuje monochromatické záření pod určitým úhlem s intenzitou $1/683 \text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}$ o frekvenci $540\cdot 10^{12} \text{ Hz}$. [4]

2.1.3 Teplota chromatičnosti

Je dána absolutně černým tělesem, které při zahřátí na danou teplotu vydává záření právě v dané barvě (Obr. 2.2). Popisuje charakter teploty světla podílem červené (teplé) a modré (studené) složky v jeho spektru. Teplota chromatičnosti T_c se udává v Kelvinech (K). Tento fotometrický parametr působí na zrakový vjem člověka, jenž se přizpůsobuje ke změnám chromatičnosti světla během periody dne. [2] [4]



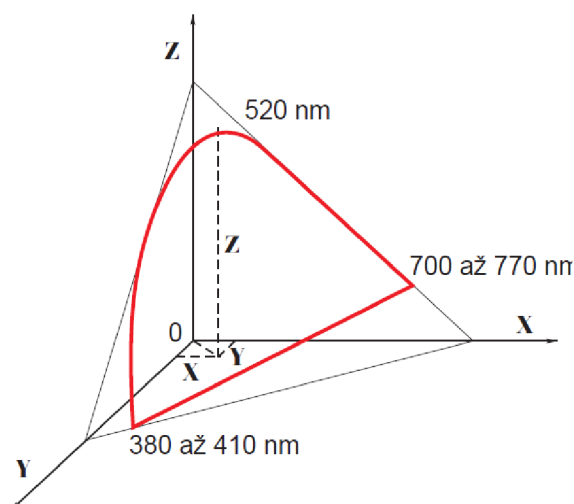
Obr. 2.2: Teplota chromatičnosti [4]

Lze ji určit výpočtem nebo měřením. Další možností je T_c zjistit z katalogů nebo datových listů výrobců zdrojů světla. Norma ČSN EN 12646-1 určuje pro některé prostory teploty chromatičnosti. Pro ostatní prostory by měla být hodnota určena na základě expertních znalostí, zkušeností a praktické použitelnosti. [5]

2.1.3.1 Trichromatické soustavy

Pro přesné charakterizování barev se užívá trichromatické soustavy, která popisuje barevný podnět světla adiční směsí třech měrně barevných podnětů.

Trichromatické složky jsou pak dány adiční směsí kolorimetrického množství těchto podnětů a značí se velkými písmeny X , Y , Z . Vyjádřením v trojrozměrné soustavě souřadnic XYZ protnutím roviny vytínajíc na osách stejné úseky ($X+Y+Z=1$) vznikne tzv. kolorimetrický trojúhelník barev, jak je znázorněno na Obr. 2.3. [2]



Obr. 2.3: Náčrt trojúhelníku barev v rovině $X + Y + Z = 1$ kolorimetrického prostoru XYZ [7]

Křivka zvýrazněná v kolorimetrickém prostoru uvnitř trojúhelníku představuje čisté spektrální barvy. Každý bod této křivky pak znázorňuje jednotlivou barvu. V případě, že nebudeme uvažovat intenzitu, ale jen barevný tón a sytost tak pro praktické zobrazení diagram barev ($X+Y+Z=1$) promítneme do roviny souřadnic x, y (Obr. 2.4 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**). [4]

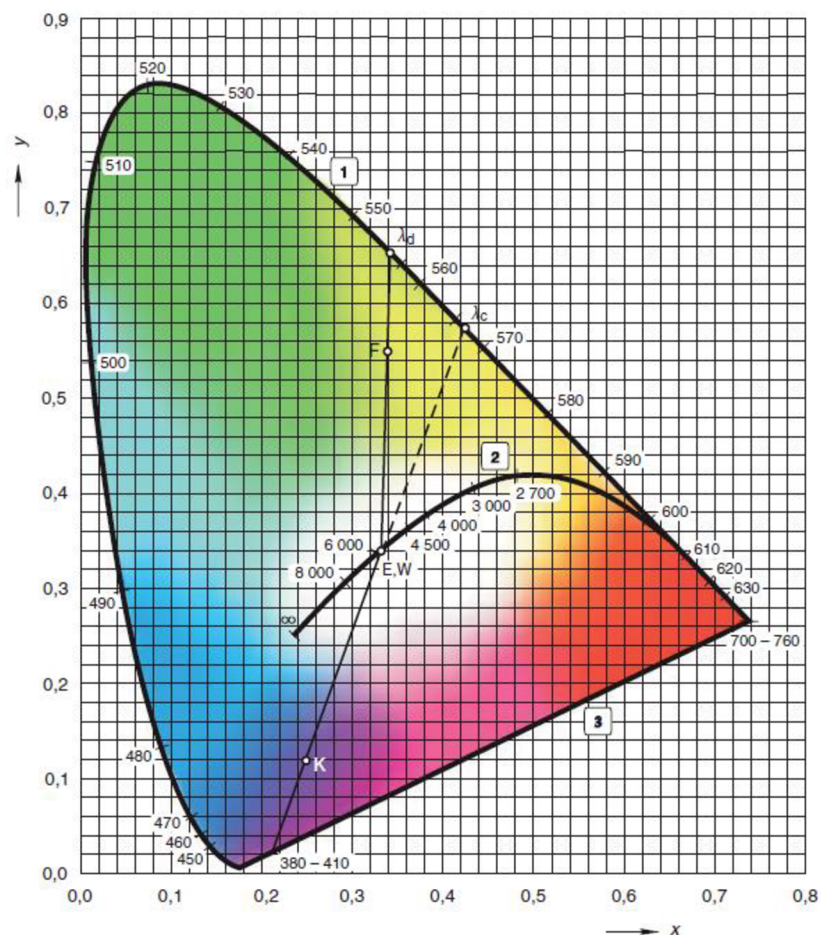
Trichromatické souřadnice (značí se malými písmeny např.: x, y, z) jsou dány podílem trichromatických složek a jejich součtu:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (2.4)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (2.5)$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (2.6)$$

platí že $x + y + z = 1$, tudíž stačí pracovat pouze se dvěma souřadnicemi x a y . [2]



Obr. 2.4: Diagram chromatičnosti mezinárodní kolorimetrické soustavy XYZ v pravouhlých souřadnicích x, y (CIE 1931) [7]

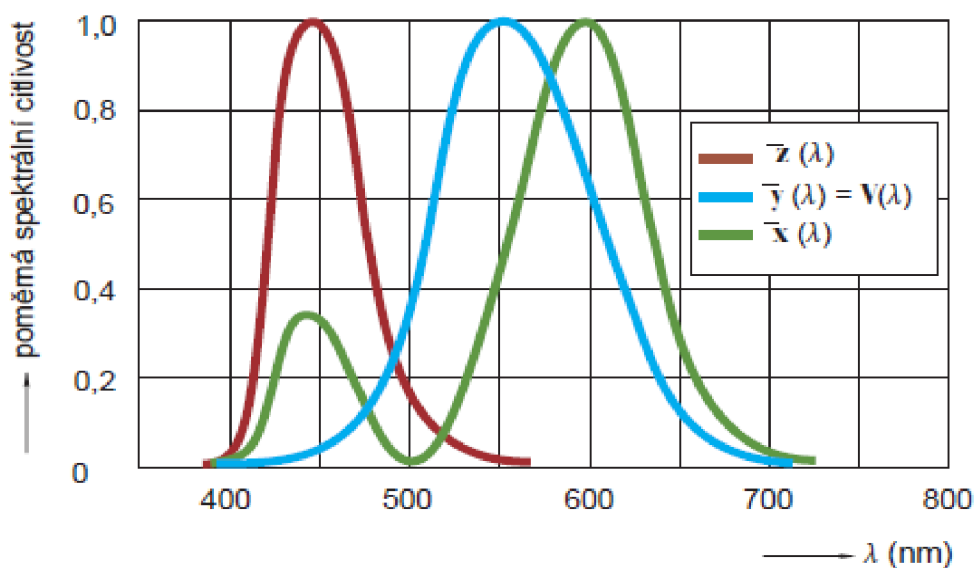
Na diagramu je znázorněna čára teplotních zářičů se stupnicí v kelvinech (2), která slouží pro určení náhradní teploty chromatičnosti světelných zdrojů za pomoci jeho trichromatických x, y souřadnic (soustava CIE 1931). Dále zmíněná křivka spektrálních barev se značením vlnových délek v nanometrech (1) a přímka purpurů (3). [2]

U kolorimetrického trojúhelníku CIE 1960, který je přibližně rovnoměrný, se využívá CIE LUV soustavy se souřadnicemi u, v , které se stanovují z hodnot trichromatických složek soustavy XYZ. Nicméně se tento diagram v dnešní době využívá pouze pro zjištění hodnoty D_{uv} , znázorňující vzdálenost bodu souřadnice barvy SZ od přímky teplotních zářičů. Zatímco diagram CIE 1976 je často používán kvůli zjišťování teploty chromatičnosti a má zmenšený zploštělý vzhled oproti CIE 1960 z důvodu zkulacení elipsovitého tvaru MacAdamových elips obsahující barevnou směs světla. [8] Jeho souřadnice u', v' jsou dány vztahy:

$$u' = \frac{4 \cdot X}{X + 15 \cdot Y + 3 \cdot Z} = u \quad (2.7)$$

$$v' = \frac{9 \cdot Y}{X + 15 \cdot Y + 3 \cdot Z} = \frac{3}{2} \cdot v \quad (2.8)$$

V trichromatické soustavě byla měrná světla stanovena tak, že hodnoty kolorimetrického koeficientu $\bar{y}(\lambda)$ jsou shodné s hodnotami poměrné spektrální citlivosti $V(\lambda)$ normalizovaného fotometrického pozorovatele (dle normy ČSN 01 1718).



Obr. 2.5: Spektrální průběhy kolorimetrických koeficientů trichromatické soustavy XYZ [7]

2.1.4 Všeobecný index podání barev

Tento fotometrický parametr posuzuje kvalitu světla vyzářeného světelným zdrojem s přirozeným slunečním světlem. Značí se R_a a udává se v bezrozměrných hodnotách od 0 do 100, kde maximum představuje podání barev při slunečním osvětlení. Těmto hodnotám dosahují teplotní světelné zdroje (obyčejná a halogenová žárovka). Pro nulovou hodnotu R_a nelze jednotlivé barvy rozeznat. Takové zdroje pak vyzařují monochromatické světlo. V praxi jsou to například nízkotlaké sodíkové výbojky, které vyzařují pouze žluté světlo. [2] [4]

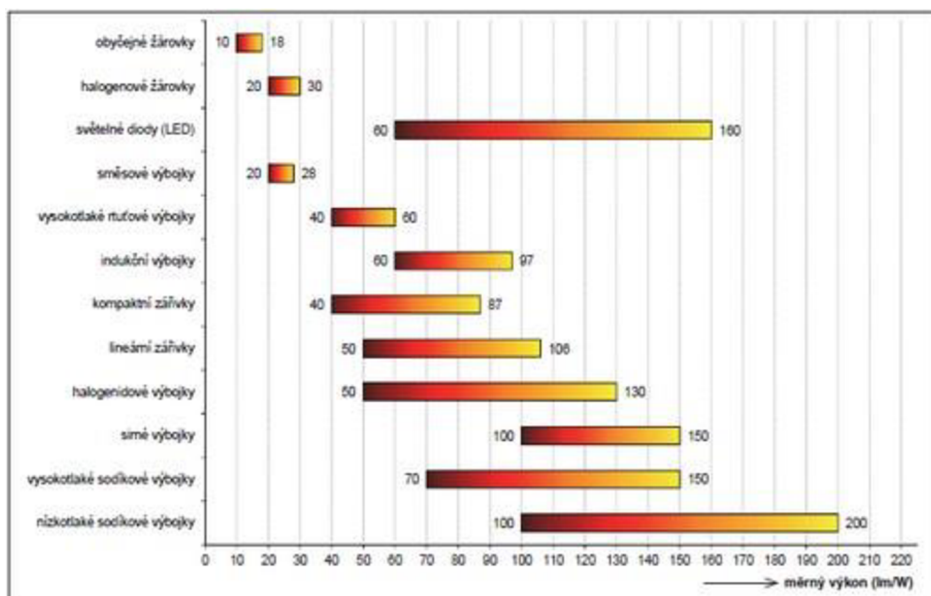
Vyhodnocování R_a se provádí porovnáním několika barevných vzorků (specifikovanými dle CIE), u kterých zjišťujeme rozdíl vnímání barev. [2]

2.1.5 Měrný světelný výkon

Měrný světelný výkon definuje účinnost světelného zdroje měnit energii z elektrické na světelnou. Značí se M_Z a vyjadřuje se v lumenech na watt (lm/W). Je tedy dán podílem světelného toku zdroje Φ (lm) ku elektrickému příkonu P (W). [2] [4]

$$M_Z = \frac{\Phi}{P} \quad (2.9)$$

Při výpočtu měrného světelného výkonu je nutné vědět, zda se udává pro světelný zdroj s předřadníkem nebo bez. U světelných zdrojů bez předřadníku je udávaný výkon shodný s jeho příkonem. Zatímco u světelných zdrojů s předřadníkem je měrný světelný výkon roven zvětšením o výkon, který spotřebuje předřadník. [4] Přehled hodnot měrného světelného výkonu různých světelných zdrojů je uveden na Obr. 2.6.



Obr. 2.6: Měrné výkony světelných zdrojů v současné době [9]

2.2 Elektrické veličiny

V této podkapitole budou zmíněny pouze veličiny účinníku a skutečného účinníku, jenž jsou důležitými parametry pro výbojové a LED zdroje.

2.2.1 Účinník

Účinník $\cos\varphi$ udává poměr činné a zdánlivé složky odebírané energie. Definuje, jaké množství činné energie na první harmonické dokáže spotřebič, dle svého charakteru, využít z energie zdánlivé. Účinník je bezrozměrná veličina s hodnotami pohybující se od 0 do 1. Usiluje se o to, aby se účinník blížil k jedné. Z tohoto důvodu se vykonává kompenzace.

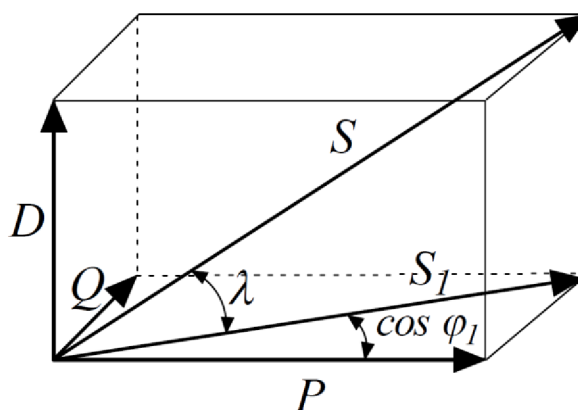
$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (-; W, VA) \quad (2.10)$$

2.2.2 Skutečný účinník

Skutečný účinník (označován dle anglického výrazu *Power Factor* – *PF*) nebo také opravdový účinník na rozdíl od $\cos\varphi$ zahrnuje všechny harmonické složky signálu.

Tato hodnota je důležitá z hlediska užití elektrické energie u nelineárních zdrojů, kde díky vyšším podílům ostatních harmonických složek dochází k odběru velkého jalového výkonu. Obvod obsahující nelineární součástky, protéká neharmonický proud, jenž pak obsahuje vyšší harmonické složky. Takto vytvořený výkon s vyššími harmonickými se nazývá deformačním, označován D [VA]. Tedy u nelineárních zdrojů deformační výkon navyšuje hodnotu zdánlivého výkonu jak je uvedeno v rovnici 2.12 a znázorněno na Obr. 2.7. Deformační výkon se snižuje nebo úplně eliminuje zapomocí tzv. PFC filtrů, které jsou u nelineárních SZ umístovány v předradnicích. PF je bezrozměrná veličina s rozmezím hodnot od 0 do 1. [10]

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{U \cdot I} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (-; W, W, VAr, VA) \quad (2.11)$$



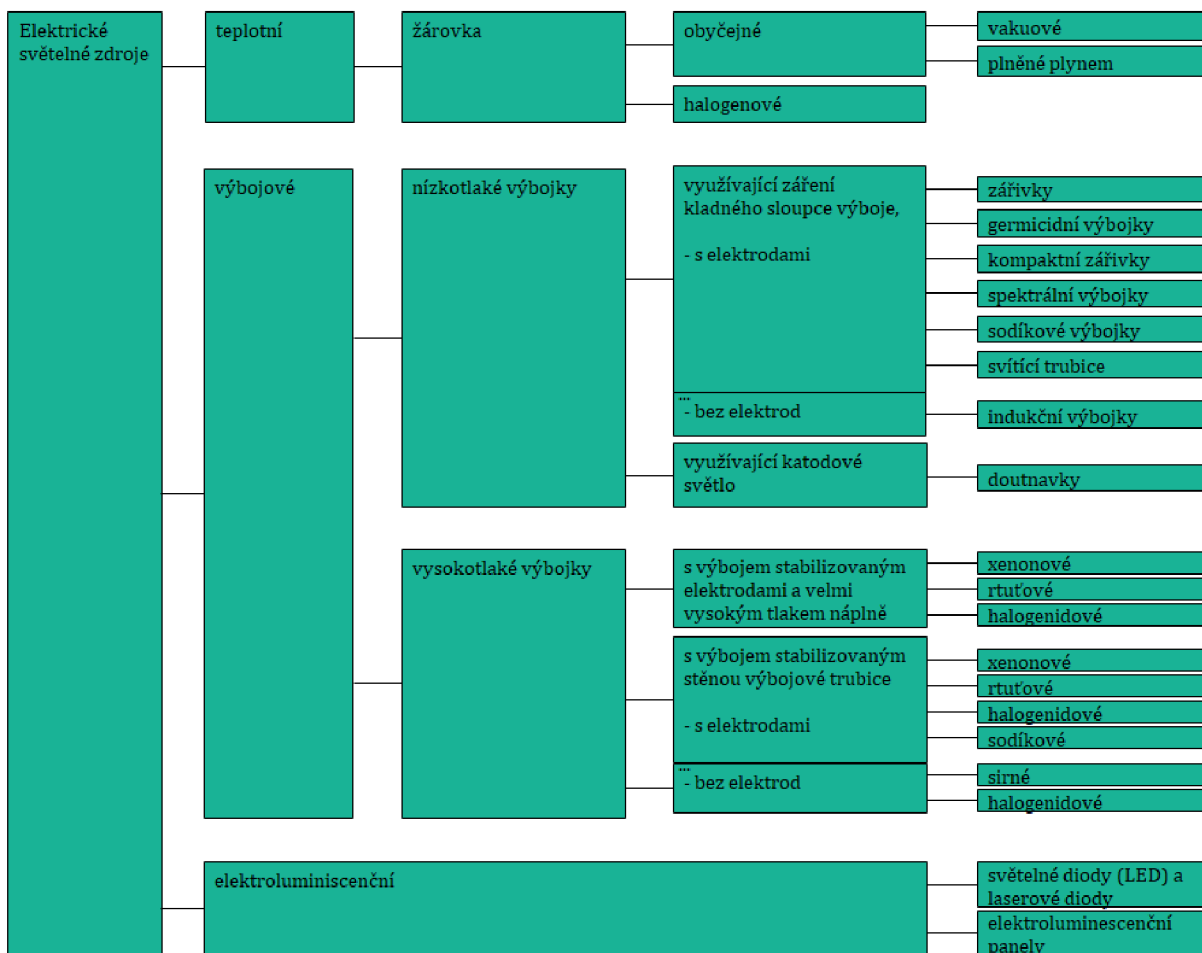
Obr. 2.7: Složky zdánlivého výkonu pro odběr s nelineární součástí [10]

3 Světelné zdroje

Světelný zdroj je těleso, které je schopné vyzařovat viditelnou část spektra elektromagnetického záření. Rozdělují se na přírodní a umělé. Mezi přírodní spadá slunce, měsíc, blesk atp., mezi umělé patří louč, svíčka, žárovka, světelná dioda a další. Tato práce se zabývá fotometrickými vlastnostmi umělých světelných zdrojů, které přeměňují elektrickou energii na světlo. Takové zdroje se pak nazývají elektrické světelné zdroje. Jejich základní rozdělení je popsáno na Obr. 3.1. [2]

Světelné zdroje se také dělí na primární a sekundární. Primárními zdroji označujeme tělesa, která vyzařují světlo vzniklé v něm přeměnou energie. Sekundární zdroje jsou potom tělesa, které záření samy o sobě nevyzařují, ale pouze jej přenáší, odráží nebo je alespoň z částí propouští. [2]

V následujících podkapitolách budou zmíněny pouze vybrané typy elektrických světelných zdrojů a jejich součásti, které byly součástí měření této práce.



Obr. 3.1: Základní rozdělení elektrických světelných zdrojů [2], upraveno autorem

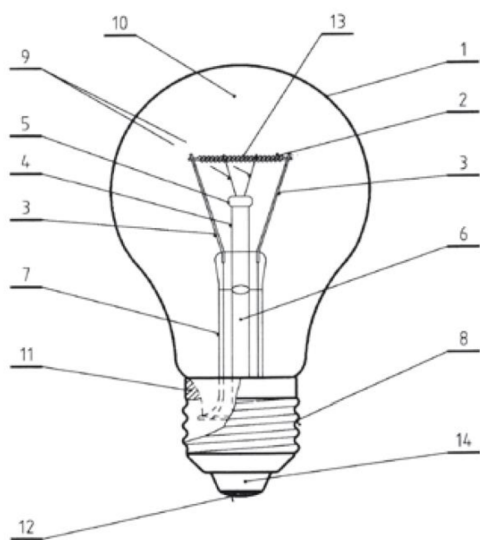
3.1 Teplotní světelné zdroje

U teplotních světelných zdrojů vzniká viditelné záření zahříváním vodivé látky (kovu) na vysokou teplotu způsobenou tokem elektrického proudu. Hlavní předností teplotních zdrojů je vyzařované spojité světelné spektrum, ale zároveň se charakterizují velmi malým světelným výkonem. [4] [11]

3.1.1 Obyčejné žárovky

Obyčejné žárovky patří v celosvětovém měřítku mezi nejrozšířenější světelné zdroje. Jsou to teplotní světelné zdroje, který vyzařují světlo z tělesa (vlákna) rozžhaveného průchodem elektrického proudu. [2] [11]

Velká výhoda těchto zdrojů je jejich spojité světelné spektrum o teplotě chromatičnosti pohybující se od 2700 do 2900 K. Další předností je všeobecný index podání barev dosahující maxima $R_a = 100$, okamžitý start bez přerušování distribuce světelného toku, stabilní svícení bez míhání a rychlé ustálení světelného toku po připojení na napájecí napětí. Pro napájení je možno využít přímo elektrorozvodné sítě bez použití předradníku. Hlavní nevýhodou je však malý měrný výkon a relativně krátká doba života závislá na napájecím napětí. [11]



Obr. 3.2: Konstrukce obyčejné žárovky [11]

- 1 - baňka,
- 2 - wolframové vlákno,
- 3 - přívody,
- 4 - tyčinka,
- 5 - čočka,
- 6 - čerpací trubička,
- 7 - talířek,
- 8 - patice,
- 9 - háčky (podpěrky),
- 10 - plynná náplň,
- 11 - tmel,
- 12 - pájka,
- 13 - getr,
- 14 - izolace patice

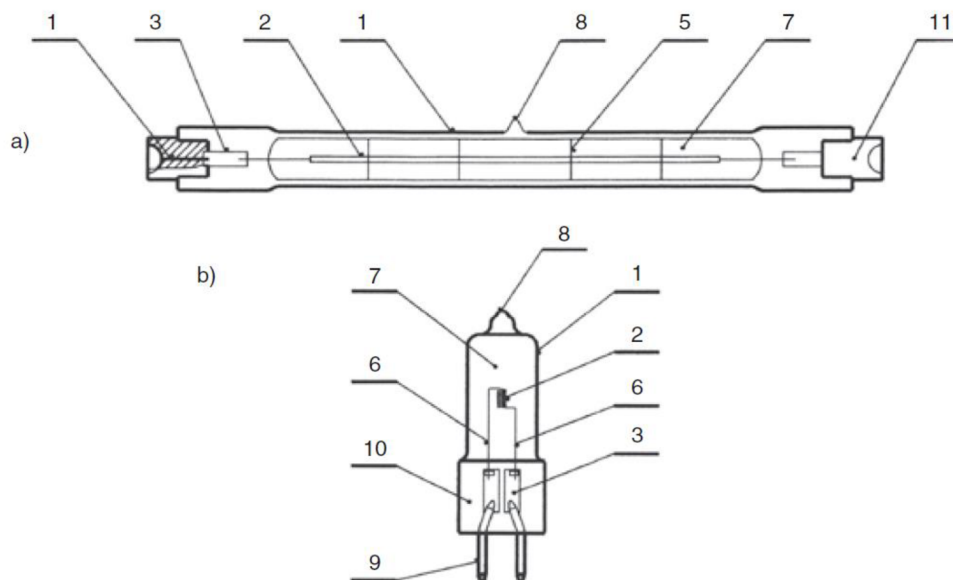
Díky jednoduché konstrukci (Obr. 3.2) lze žárovku vyrábět pro široký rozsah napětí a velikostí průřezu vlákna určovat její příkon. To bývá nejčastěji wolframové vlákno o průměru od 10 μm do 120 μm (čemuž u žárovek odpovídá 15-200 W), které je svinuto do jednoduché nebo dvojité šroubovice. Vlákno je napájeno přívody (slitina Ni, Cu s příměsí Fe, Mn) a podpíráno háčky, které musí mít velmi dobré tepelné vlastnosti, aby vydržely provozní teplotu vlákna. Baňka je tvořena vápenato-hořečnatým sklem a užívá se v čirém, matovaném, zrcadleném či barevném provedení. Ostatní skleněné části v žárovce jsou vyráběny z olovnatého skla, jenž má

malou elektrickou vodivost i za provozních podmínek. Náplň žárovky je tvořena kryptonem nebo xenonem s příměsí dusíku nebo je vakuovaná. Obvyčejné žárovky nejčastěji používají patice E27 zhotovené z hliníku nebo pozinkované mosazi, které jsou k baňce připevněné speciálním tmelem. Používají se také patice E14 nebo bajonetové Ba22d. [2] [11] [12]

3.1.2 Halogenové žárovky

U halogenových žárovek je princip funkce obdobný jako u obvyčejných žárovek. Jejich výhodou je plynná náplň s příměsí halových prvků (Br, I). U obvyčejných žárovek se při provozu částečně odpařuje wolfram a usazuje uvnitř baňky, to trvá do doby, kdy je vlákno příliš tenké a přepálí se. Halogeny umožňují „regeneraci“ wolframového vlákna díky halogenovým cyklům. Ty probíhají tak, že vypařovaný wolfram se v chladnější části baňky sloučí s halogeny a vytvořená sloučenina se vrátí na vlákno díky tepelnému poli v baňce. Halogeny se potom vrátí do chladnějších prostor baňky a proces se znovu opakuje. [4]

Mezi hlavní výhody halogenových žárovek ve srovnání s obvyčejnými žárovkami patří vyšší měrný světelný výkon (kolem 25 lm/W), delší životnost díky halogenovým cyklům (4000–5000 hod.). V baňce se neusazuje wolfram, který brání v distribuci světelného toku, jenž je během celé životnosti stabilní. Halogenová žárovka má také vyšší teplotu chromatičnosti pohybující se kolem 3000 K a velkou teplotní odolnost. Konstrukce halogenové žárovky je popsána na Obr. 3.3. [2] [4]



Obr. 3.3: Konstrukce halogenové žárovky [13]

a) dvoustisková žárovka, b) jednostisková žárovka, 1 – baňka, 2 – wolframové vlákno, 3 – molybdenová fólie, 4 – molybdenový přívod, 5 – podpěrka, 6 – koncečky vlákna, 7 – plynná náplň, 8 – odpalek čerpací trubičky, 9 – kolík, 10 – stisk, 11 – keramická patice

3.2 Výbojové světelné zdroje

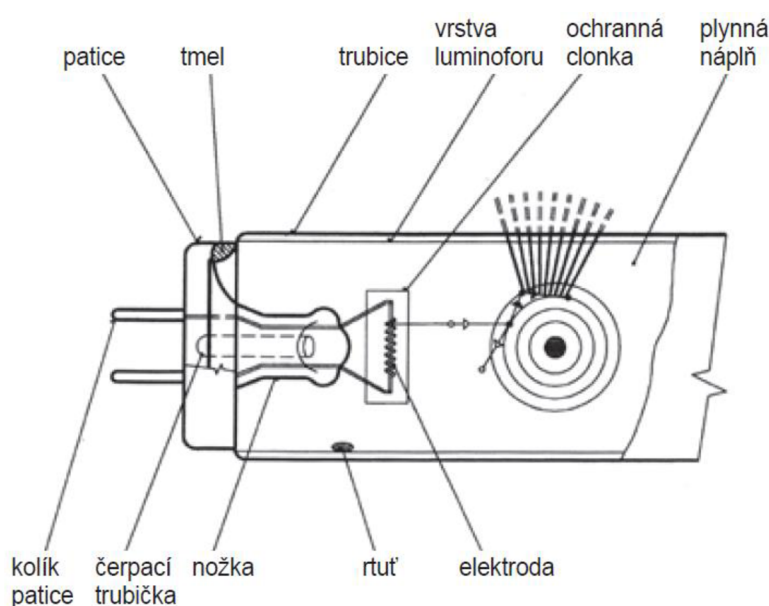
Princip výbojových světelných zdrojů se zakládá na elektrických výbojích v plynech a parách různých kovů. Díky kinetické energii elektronů, přeměněné z elektrické, se elektrony sráží s atomy plynů a vytváří viditelné záření. [4]

3.2.1 Lineární zářivky

Lineární zářivky jsou nízkotlaké rtuťové výbojky, které jsou nejčastěji tvarované do trubice. Princip těchto zářivek spočívá v produkování ultrafialového záření excitací atomů rtuti, které jsou vybuzeny elektrodami umístěnými na koncích trubice. Luminofor nanesený na vnitřní straně trubice přeměňuje UV záření na viditelnou část spektra. Změnou typu nebo nanesením více počtu vrstev luminoforu můžeme měnit spektrum vyzařovaného světla, náhradní teplotou chromatičnosti (2700–17000 K), měrný výkon (až 104 lm/W) a všeobecného indexu podání barev (až 80). Popis konstrukce lineární zářivky je uveden na Obr. 3.4. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Zářivky se vyrábí v mnoha rozměrech a typech, ale nejčastější zářivky jsou T5 s patičí G5 a T8 s patičí G13. [2] [4] [14]

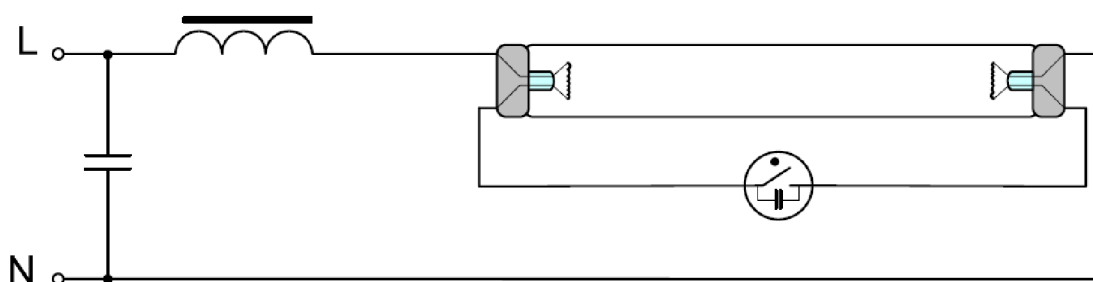
Výhoda těchto zdrojů je také možnost konstruovat materiálůvě úsporná svítidla využívající jednoduchou optiku. Mezi další přednosti patří výroba v širokém rozsahu příkonů (4-200 W), dlouhá doba životnosti (až 20 tisíc hodin), rychlý start a stabilní svícení bez mihání. [2] [14]

Mezi nedostatky zářivek se řadí hlavně její závislost světelného toku na teplotě okolí a nezbytnost startéru a elektronického předřadníku, který snižuje měrný výkon zdroje. Dále i vliv počtu zapnutí na délce životnosti zdroje a nutnost vysloužilý zdroj likvidovat u určených organizací. [2] [14]



Obr. 3.4: Konstrukce lineární zářivky [14]

Lineární zářivka, jako i jiné výbojové světelné zdroje, má nelineárně klesající VA charakteristiku. Při zvyšování proudu klesá napětí na výboji a tím dochází k dalšímu nárůstu proudu. Z tohoto důvodu je výboj stabilizován a omezen předřadníkem, což bývá u jednodušších případů řešeno tlumivkou (Obr. 3.5). Na zázorněném schématu zapojení je obvod doplněn i o kompenzační kondenzátor. Elektronický předřadník pak nahrazuje soubor těchto přístrojů jako je tlumivka, startér, popřípadě i kompenzační kondenzátor, do jednoho celistvého obvodu. [2] [15]



Obr. 3.5: Zapojení lineární zářivky s indukčním předřadníkem a doutnavkovým startérem [15]

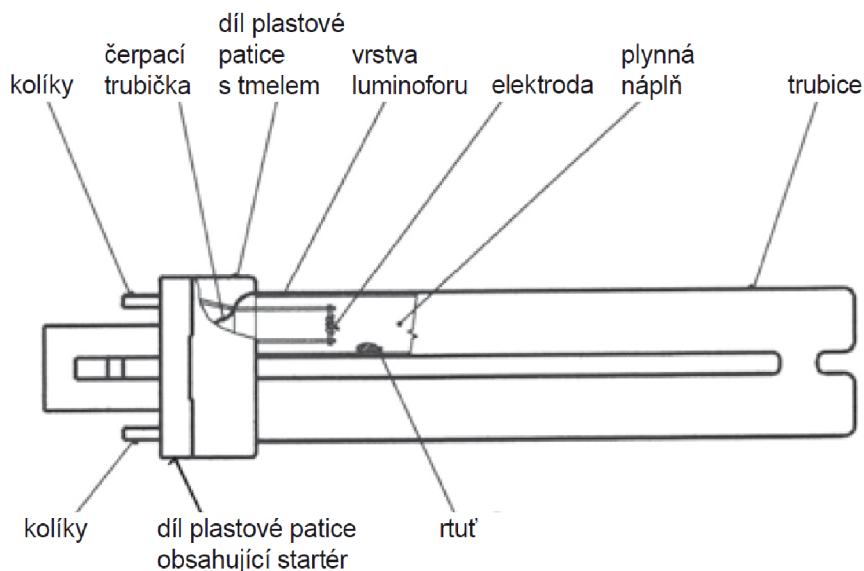
Startér pracuje na jednoduchém principu spínání bimetalového kontaktu, který je ohříván teplem výboje. Než se bimetal znovu ochladí a rozpojí prochází jím proud, který budí magnetický obvod tlumivky a ohřívá elektrody zářivky. Po rozpojení bimetalu změna proudu na tlumivce způsobí pokles magnetického toku na tlumivce, což zapříčiní indukci vysokého napětí na svorkách tlumivky, které se vyskytne mezi elektrodami na opačných koncích zářivky a zapříčiní opětovné zažehnutí výboje. Tento děj se opakuje, dokud se zářivka nezahřeje na teplotu, kdy výboj začne stabilně hořet, poté startér přestane pracovat díky snížení napětí na jeho svorkách. Zářivka stabilně svítí až do přerušení napájení. [15]

3.2.2 Kompaktní zářivky

Jsou principiálně stejné jako lineární zářivky liší se však svou konstrukcí, která je uzpůsobena svými geometrickými a světelnými parametry tak, aby efektivně nahradila neekonomické obyčejné žárovky. Jedná se tedy o nízkotlakou rtuťovou výbojku, která stejně jako u lineárních zářivek vytváří UV záření, jenž luminofor přeměňuje na viditelné světlo. Hlavní předností těchto zdrojů je možnost připojení do obvodu pouze jednou patičkou což zjednodušuje i řešení konstrukce svítidla. [2] [16]

Konstrukce je nejčastěji tvořena stočenou trubicí do tvaru U nebo také do tvaru šroubovice. Spojováním většího počtu trubic v jednom celku (2, 4, 8 i více) za účelem většího výbojového prostoru lze zvýšit měrný výkon světelného zdroje.

Taková konstrukce je popsána na Obr. 3.6, kde je uvedena čtyřnásobná kompaktní zářivka se zabudovaným doutnavkovým startérem, která patří k nejrozšířenějšímu typu této skupiny. [2] [15] [16]



Obr. 3.6: Konstrukce zářivky se zabudovaným doutnavkovým startérem a paticí G24-d [16]

Kompaktní zářivky, stejně jako ostatní výbojové zdroje, musí být doplněny o startér a předřadník, popřípadě i kompenzací. Z hlediska pracovního obvodu lze tyto zdroje rozdělit do dvou skupin, a to zářivky s externím předřadníkem a zářivky s integrovaným předřadníkem. [2] [15]

Zářivky s externím předřadníkem používají tlumivku nebo elektronický předřadník, který pracuje na vysoké frekvenci (30-40 kHz). Zářivky používající tlumivku jsou vybaveny dvoukolíkovou paticí (např.: G23, G24d-1,2,3, GX24d-1,2,3 a jiné) se zabudovaným doutnavkovým startérem. Funkce startéru je obdobná jako u lineárních zářivek. Objevují se i tandemová zapojení, v nichž jsou zapojeny dvě zářivky do série s jednou tlumivkou. Pro provoz s externím elektronickým předřadníkem se využívá čtyřkolíková patice (např.: 2G7, 2G11, G24q-1,2,3, GX24q-1,2,3,4,5,6 a jiné). Předřadník zlepšuje parametry osvětlení a zrakovou pohodu. Tento typ zářivek vyžaduje upravenou konstrukci svítidla, u kterých při poruše stačí vyměnit pouze zářivku, což vynahrazuje pořizovací cenu svítidla. [2] [15]

Zářivky s integrovaným předřadníkem jsou stanoveny pro užívání v žárovkových svítidlech jakožto jejich ekonomická náhrada. Používají tedy patice E27 a E14, také patice B22 a novější G28d. Elektronický předřadník je součástí zdroje, umístěn v plastovém krytu u patice. Díky pokroku ve zmenšování součástí a jejich vyšší spolehlivosti se tyto obvody stali velmi kompaktními. Spolu s vhodně tvarovanou trubicí umožňuje dodržet parametry pro svítidla určené žárovkám. [2]

Předností těchto zdrojů je nejen již zmíněná velikost a schopnost je užívat ve svítidlech pro žárovky, ale i jejich světelný tok a kvalita podání barev ($R_a = 80$) s příkonem od 15 do 200 W. Měrný výkon dosahující až 87 lm/W u zářivek s externím elektronickým předřadníkem (ve srovnání s obyčejnou žárovkou až 80 % energetická úspora). Výběr zdrojů ve velkém rozsahu náhradní teploty chromatičnosti od 2700 do 6500 K. Doba životnosti u kvalitnějších zdrojů dosahuje až 20 tisíc hodin. Zářivky s vysokofrekvenčním předřadníkem startují okamžitě bez míhání se stabilní distribucí světelného toku. [2]

Nedostatky kompaktních zářivek jsou obdobné jako u lineárních zářivek, to je závislost parametrů zdroje na teplotě okolí, životnost závislá na počtu zapnutí a obsah jedovaté rtuti. Maximální příkon je omezen parametry elektrického výboje a parametry sítě. [2] [16]

3.3 Elektroluminiscenční světelné zdroje

Mezi elektroluminiscenční světelné zdroje patří světelné diody LED (z anglického *Light Emitting Diode*), laserové diody a elektroluminiscenční panely. U světelných a laserových diod se využívá PN přechodu, který při buzení tokem elektrického proudu vyzařuje viditelnou část záření. Elektroluminiscenční panel vytváří světlo buzením elektrickým polem v pevné látce (luminofor). Z hlediska osvětlení jsou nejpodstatnější LED zdroje, které mají v poslední době velký rozvoj. [2]

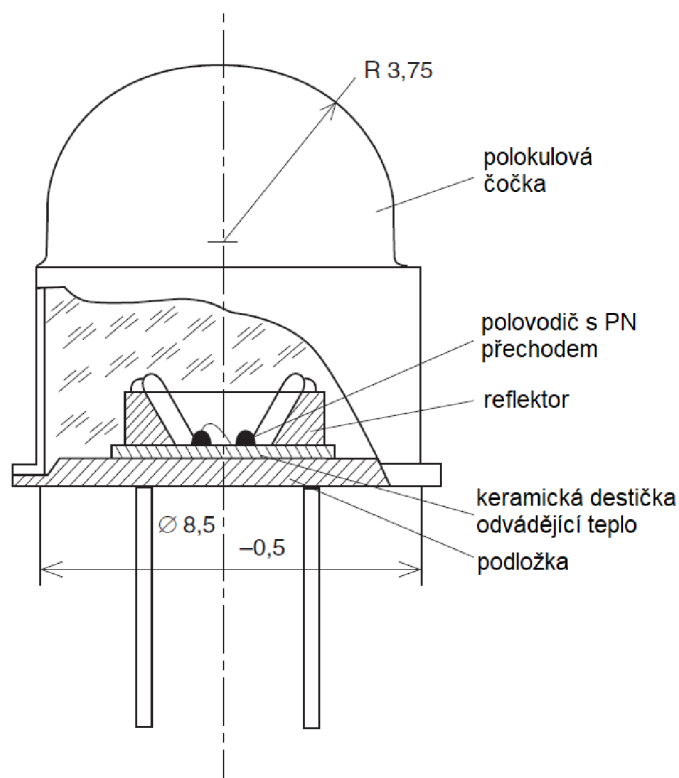
3.3.1 Světelné diody (LED)

LED světelné zdroje jsou v současnosti nejvíce rozvíjené a diskutované elektrické zdroje. Ze začátku se používali pouze jako signálky, kontrolky a menší zdroje světla, ale dnes patří k běžným světelným zdrojům. Budoucí vývoj LED závisí na rozvoji polovodičové techniky. Prozatím jsou teoretické možnosti zvyšování měrného výkonu LED na tolik pozitivní (60 lm/W u modrých, 200 lm/W a více u bílých, 260 lm/W pro červené, 500 lm/W a více pro žluté a téměř 590 lm/W u zelených diod), že stanovují tyto zdroje mezi hlavní světelné zdroje v budoucí době. [2]

Princip světelných diod je založen na PN přechodu, který při průchodu stejnosměrného proudu způsobuje přechod minoritních nosičů z N do P oblasti polovodiče. Dojde k rekombinaci páru elektron-díra v P oblasti, která má za následek fotonovou emisi. Energie elektronu nutná k překonání zakázaného pásu se nazývá vyzařující rekombinace, jež vytváří fotony v oblasti pro viditelné světlo a také v oblasti infračerveného záření v podobě tepla. [5]

Pro vytvoření PN přechodů se využívá vysoce čistých polovodičů 5. a 13. skupiny periodické tabulky, jež jsou legované malým množstvím příměsí tvořící buď přebytek (typ N) nebo nedostatek elektronů (typ P). Moderní polovodičové materiály vyžadují náročné technologické postupy, které však zajišťují lepší

účinnost a světelné parametry LED (např.: GaAs, AlGaAs, GaP, GaAsP, AlGaInP u červených, oranžových a žlutých diod nebo GaN, ZnSe, InGaN u zelených, modrých a fialových diod). Základní konstrukční uspořádání světelné diody je popsána na Obr. 3.7. [2]

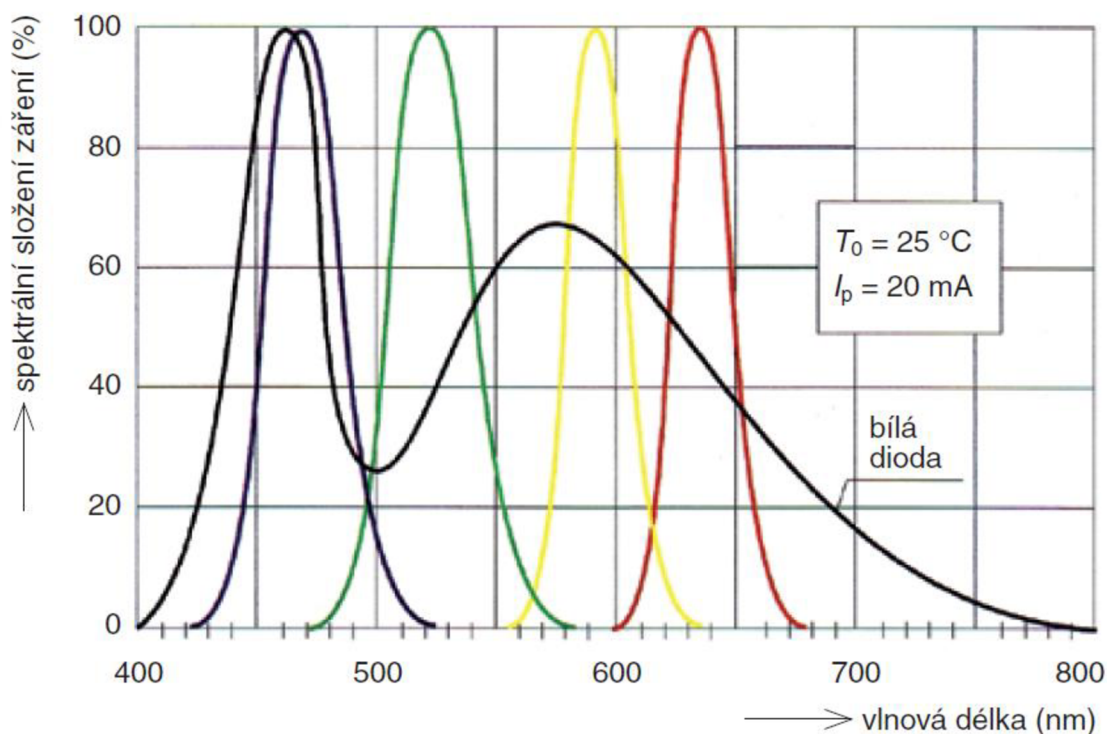


Obr. 3.7: Základní konstrukce světelné diody se dvěma krystaly [17], upraveno autorem

Získání bílého světla lze dosáhnout dvěma způsoby, a to míšením světla nebo využitím funkce luminoforu. První zmíněný způsob se zakládá na klasickém míšení zelené, červené a modré barvy, je ale zapotřebí náročný hardware a software. Další nevýhodou je degradace jednotlivých čipů v průběhu života, což zapříčiní pokles světelných parametrů. Druhý způsob využívá luminoforu $Y_3Al_5O_{12}:Ce$, jenž je buzen modrým světlem diody InGaN nebo třípásmovým luminoforem buzeným zářením UV diody. Výsledné světlo dosahuje hodnot všeobecného podání barev nad 80. To je více než u prvního způsobu, u kterého je utlumena zelená a červená složka spektra. [2]

Parametry bílých LED zdrojů se pohybují ve velkých rozsazích. Náhradní teplota chromatičnosti pro teplé světlo je od 2500 do 4000 K, pro chladnější odstíny od 5000 do 10 000 K. Proud tekoucí diodou se pohybuje v jednotkách miliampérů a rozdělují se do tří kategorií: malé výkony s proudem 1-2 mA, standartní výkony s proudem větším než 20 mA a speciální s proudem větším než 350 mA. Světlo vydávané čipem se usměřňuje pomocí optických prvků a krytu z epoxidové pryskyřice. Barva pryskyřice je zpravidla stejná jako barva světla vyzařovaného. [2]

Na Obr. 3.8 jsou znázorněna spektra vyzařovaná různě barevnými LED zdroji. [17]



Obr. 3.8: Vyzařované spektrum vybraných barevných LED [17]

Pro napájení LED zdrojů se používají napájecí moduly (předřadníky), které zajišťují přísun konstantního stejnosměrného proudu, který zabezpečuje i jejich ideální provozní teplotu (85–100 °C). Stejně jako u kompaktních zářivek je i u LED snaha využít svítidla určená původně pro jiné světelné zdroje. Velikost LED modulu umožnila vývojářům navrhnout světelné zdroje s integrovaným napájecím modulem ve standartních typech patič (E27, E14, B22 i do trubcových T8 a T5). Tímto lze nahradit ve svítidle obyčejné žárovky, halogenové žárovky, lineární zářivky a nízkowattové zářivky. [2]

Mezi klady LED zdrojů patří již zmíněné geometrické parametry. Dále krom LED zdrojů ve tvaru žárovky s kovovým chladičem, nevyžadují ochranu vůči dotyku. Možnost zvýšení světelného toku spojením zdrojů do série. Snadná regulace díky stejnosměrnému napájení, které přináší i jiné výhody. Mezi další výhody patří velký měrný výkon (60-160 lm/W), vysoká hodnota R_a v potřebné stupnici chromatičnosti, vysoce dlouhá doba života (60 až 10 tis. hodin), spolehlivost provozu a také šetrnost vůči životnímu prostředí. [2]

K nevýhodám LED patří zejména jejich vysoká cena a závislost parametrů na okolní teplotě. [2]

4 Metodiky měření fotometrických veličin

Způsobů měření fotometrických veličin je hned několik a každé z nich má své opodstatnění dle toho jaké světelné parametry chceme zjistit. Ve své práci budu popisovat tři typy měření které jsem použil, a to měření světelného toku v kulovém integrátoru, měření čar svítivosti na goniofotometru a měření křížových charakteristik SZ. [2]

Metody měření se dělí na vizuální, kde je indikátorem zrak, a v této práci použitou fyzikální, kde se měří za pomoci fyzikálních čidel. Tato metoda vyžaduje vhodné a kvalitní světelné etalony, jenž je nutno opakovaně kontrolovat a kalibrovat, aby nedocházelo ke zbytečně vysoké chybě měření. Pro fotometrické měření je základním etalonem svítivosti speciální žárovka s rovným vláknem, aby bylo možné jednoznačně změřit vzdálenost etalonu od čidla fotometru. Svítivost tohoto normálu se udává při stanoveném napájecím napětí a proudu, pro danou teplotu chromatičnosti kolmě vůči vlákně etalonu. K dosažení správných výsledků měření je zapotřebí dodržet několik podmínek:

- optické části fotometrů a SZ i svítidel nesmí být znečištěny
- měření nesmí být ovlivněno spektrem z cizího zdroje nebo nežádoucím rozptýleným světlem
- fotometrická vzdálenost musí být dostatečná, tak aby bylo možné takový zdroj považovat za bodový (několika násobně větší, než je největší vyzařovací plocha SZ či svítidla)
- dále i stabilita přístrojů a etalonů, nelinearita, teplotní závislost, odchylka od kosinusového zákona a neshoda s křivkou poměrné spektrální citlivosti normalizovaného pozorovatele
- je nutné nechat před měřením zahořet (zahřát na pracovní teplotu) měřený zdroj světla i etalon [2]

Požadavky na přesnost měřených veličin se rozlišují podle jejich účelu a přesnosti na přesná, provozní a orientační měření. Tato práce náleží do kategorie přesných laboratorních měření, kde je odhad rozšířené nejistoty $U \leq 8\%$. [2]

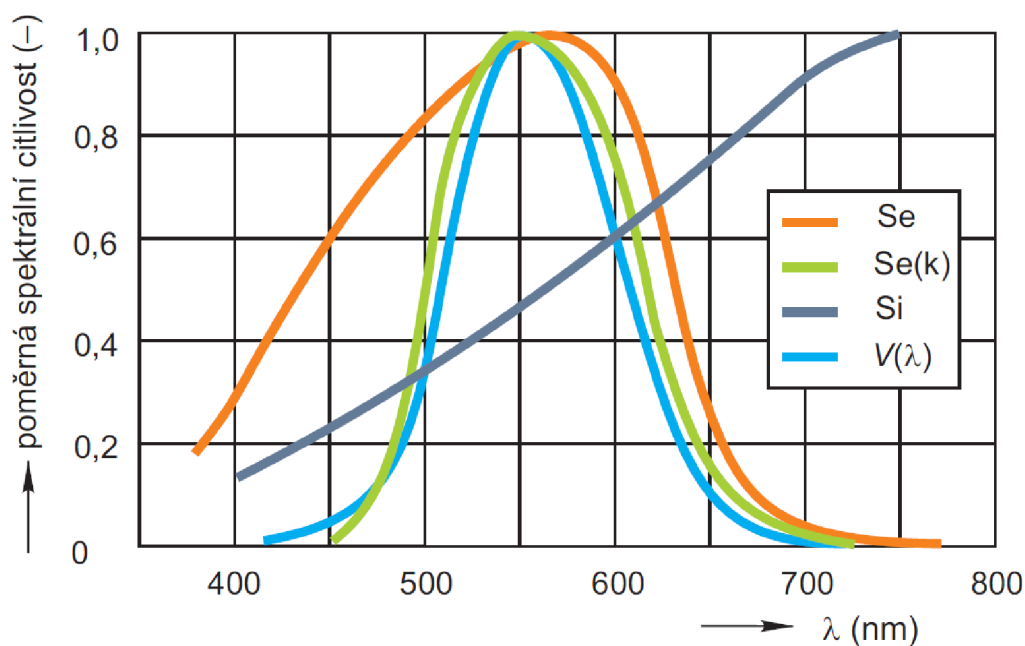
4.1 Měřicí přístroje

V této podkapitole budou zmíněny pouze přístroje použité v měření praktické části.

Hlavním prvkem ve fotometrických měřících přístrojích jsou hradlové fotoelektrické články (fotočlánky, fotodetektory), které využívají fotoelektrického jevu na P-N přechodu. U starších fotočlánků se jako polovodič používal selen, dnes se nejčastěji používá křemík a arzenid galia. Článek se kromě přechodu skládá z kovové podložky (Fe, Al), průsvitné vrstvy na článku (Pt, Ag, Au) a kruhové elektrody pro odvod elektrického proudu. [2]

Fotoelektrický jev (vnitřní) zde probíhá díky úzkému zakázanému pásmu fotočlánku (nejčastěji fotodiody). Jestliže elektron pohltí ve valenčním pásmu foton o energii vyšší, než je šířka zóny zakázané, vznikne pár elektron-díra a vzniklé elektrony přechází do vodivostního pásu polovodičové vrstvy N a díry do vrstvy P. Tím zvyšuje hustotu volných nosičů a vodivost látky (fotovodivost). Na P-N přechodu pak vzniká elektrický proud úměrný velikosti osvětlení povrchu fotočlánku. [18]

Vlastnosti tohoto článku musí především vyhovovat průběhu křivky spektrální citlivosti $V(\lambda)$ normálního fotometrického pozorovatele což má velký vliv na měření výbojových SZ, které mají nesourodé čárové světelné vyzařované spektrum. U LED zdrojů je světelné spektrum vyšší u modré (450 nm) a žlutooranžové (600 nm) hodnoty vlnové délky spektra. To až tak dobře nekopíruje křivku křemíkového fotočlánku (Obr. 4.1). [19]



Obr. 4.1: Průběhy poměrné spektrální citlivosti polovodičových fotočlánků v porovnání s poměrnou spektrální citlivostí $V(\lambda)$ normalizovaného pozorovatele [19]

Aby se dosáhlo zkorigování citlivosti křemíkového fotočlánku na křivku $V(\lambda)$, využívá se diferenciálních filtrů, které modelují křivku bod po bodu nebo přidáním materiálových příměsí (k) jak je znázorněno na Obr. 4.1. U delších měření může dojít k tzv. únavě fotočlánku což zapříčiní pokles generovaného elektrického proudu při stálé osvětlenosti. [2]

Linearita článku je závislá hlavně na odporu vnějšího obvodu článku. Z toho důvodu se používá kompenzačního zapojení s měřením proudu fotočlánku nakrátko, což značně snižuje celkovou chybu měření. [2]

4.1.1 Spektroradiometry

Spektroradiometr je přístroj sloužící k měření spektra elektromagnetického záření, spektrofotometr měří pouze oblast spektra viditelného záření. Rozkládají měřené spektrum pomocí mřížky nebo hranolu. Spektroradiometr použitý v této práci (JETI specbos 1211UV - Obr. 4.2) dokáže zpracovávat krom složení dopadajícího záření i jas, osvětlenost, trichromatické souřadnice, náhradní teplotu chromatičnosti, dominantní vlnovou délku a index podání barev. [4]



Obr. 4.2: Spektroradiometr JETI specbos 1211UV [20]

4.1.2 Luxmetry

Luxmetry jsou přístroje na měření, nejčastěji rovinné, intenzity osvětlení. Úhel snímaný luxmetrem pro měření rovinné osvětlenosti má být ve všech rovinách kolmý vůči měřené rovině, ve které se určuje osvětlenost. Fotometrický detektor je opatřen difúzním (kosinovým) nástavcem kvůli zmenšení směrové chyby měření a filtrem pro korelaci se spektrální citlivost $V(\lambda)$. [4]

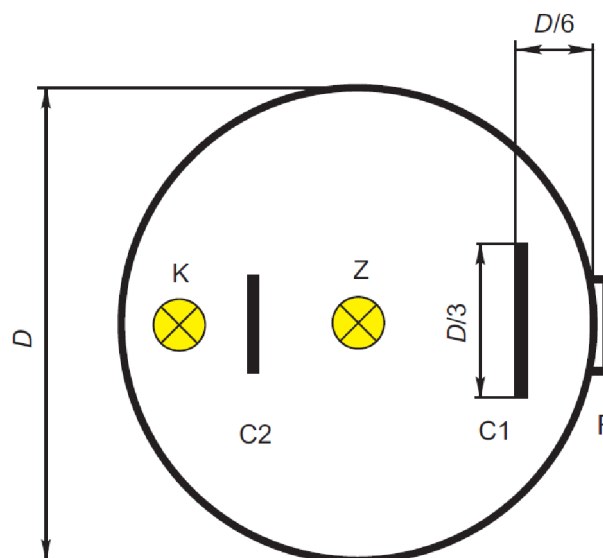


Obr. 4.3: Luxmetr RadioLux 111 [4]

4.2 Měření světelného toku na kulovém integrátoru

Funkce kulového integrátoru spočívá v jeho schopnosti mnohonásobně rozptýleně odrazet světelný tok, to vytvoří rovnoměrné rozložení osvětlenosti (i jasů) na vnitřní stěny integrátoru, bez ohledu na prostorové rozložení světelného toku SZ. Tento rozptýlený tok pak měří fyzikální čidlo spektrometru. Tímto způsobem se obchází komplikovanému integrování při výpočtu světelného toku. [15]

Koule mají na vnitřní stěnu nanosenou vrstvu barvy, která je barevně neselektivní, trvalá a pravidelně obnovovaná, aby se udržel činitel odrazu ρ v rozmezí od 0,75 až 0,85. Nátěr bývá tvořen různých bázi s příměsí zinku, titanu nebo baru, jakožto hlavní bílé složky. Použitý kulový integrátor byl natřen barvou na bázi síranu barnatého (BaSO_4) s výše uvedenými vlastnostmi. [2] Náčrt vnitřního rozložení využitého kulového integrátoru je zobrazen na Obr. 4.4.



Obr. 4.4 Náčrt rozložení kulového integrátoru [21]

Kulový integrátor o vnitřním průměru D (2,5 m) obsahuje rozmístěné clony C1 a C2 tak, aby nešlo přímé nerozptýlené světlo do měřícího zařízení F (v našem případě spektrometr). Clony jsou ve tvaru kruhu, nejčastěji o třetinové délce vnitřního průměru koule D (0,83 m). Čidlo zařízení F je od své clony C1 vzdáleno šestinovou délkou D (0,42 m). Clonou je navzájem oddělen i měřený světelný zdroj Z, s korekčním normálem K. [2]

Pokud měříme SZ bez svítidla tak měření probíhá substituční metodou, kde se do integrátoru vloží etalon světelného toku a udá se konstanta kulového integrátoru k_i . Poté se normál vymění za měřený světelný zdroj. Měřené údaje fotometru se po vynásobení konstantou rovnají světelnému toku měřeného SZ. [2]

V této práci bylo použito napájecího kabelu s keramickou patičí E27, oboje v černém provedení kvůli absorpci světla a snížení jeho nesprávné distribuci. Pro takový případ je nutné použít metodiku měření s korekční žárovkou (K-korekční normál). Ta je umístěna u stěny koule za clonou (C2), aby přímo ne osvětlovala měřený SZ. Pro kvalitní korekci je dobré, aby se příliš nelišilo od světelného toku SZ.

Postup měření s korekčním zdrojem:

1. Při rozsvíceném normálu a zhasnutém korekčním zdroji (E_N)
2. Při zhasnutém normálu a rozsvíceném korekčním zdroji (E_{kN})
3. Při zhasnutém měřeném SZ a rozsvíceném korekčním zdroji (E_{kx})
4. Při rozsvíceném měřeném SZ a zhasnutém korekčním zdroji (E_x)

Je-li stanovený světelný tok normálu Φ_N , tak světelný tok měřeného SZ Φ_x je:

$$\Phi_x = \Phi_N \frac{E_x}{E_N} \cdot \frac{E_{kN}}{E_{kx}} \quad (4.1)$$

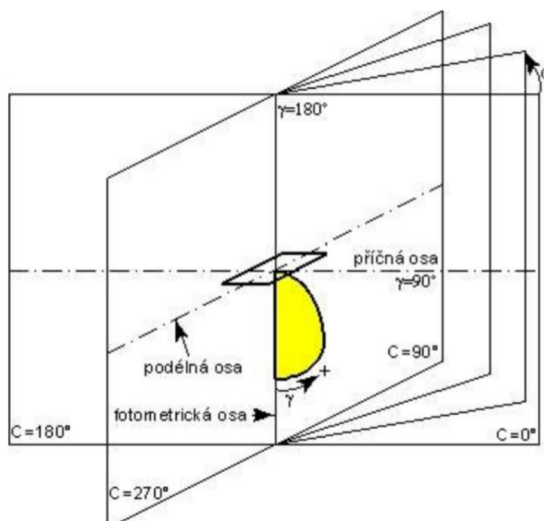
Poměr hodnot (E_{kN}/E_{kx}), představuje korekci vlivu absorpce neaktivních částí. [2]

Před začátkem samotného měření je nutné nechat zahořet všechny zdroje pro ustálení jejich světelnotechnických parametrů. Pro žárovky to je pár jednotek minut, závisící na tloušťce vlákna, u výbojových zdrojů 20 a více minut a pro LED zdroje 25 minut a více, ale záleží na jeho celkovém provedení (chladič, předřadník, materiál, počet čipů ad.).

Přesnost měření v kulovém integrátoru je ovlivněna hlavně vlastnostmi fotočlánku spektrometru (závislost fotoelektrického proudu na osvětlenosti) a na změnách teploty uvnitř integrátoru. Kvalita fotočlánku a jeho linearita se musí pravidelně kontrolovat a korigovat s korekčními křivkami. Teplotní vliv lze omezit zahořováním zdroje při otevřeném kulovém integrátoru. Při laboratorním měření můžeme započítat i nejistotu stabilizovaného napájecího zdroje. Nestejnoměrný povrch a obnova vnitřního nátěru, poloha clon, dodržování poměrů velikostí vzdáleností a geometrických rozměrů má také svůj podíl na chybě měření. Kombinovaná nejistota měření světelného toku v integrátoru při měření teplotních SZ bývá kolem 3 %, pro výbojové zdroje kolem 4 %. [2]

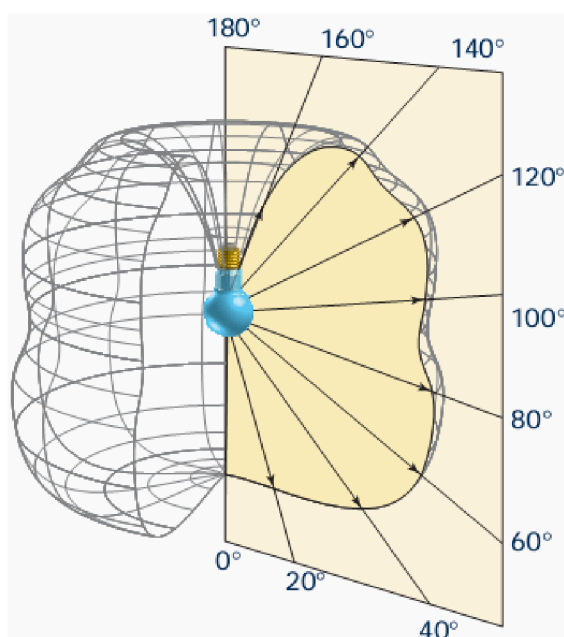
4.3 Měření křivek svítivosti na goniofotometru

Goniofotometr je laboratorní zařízení pro měření prostorového rozložení svítivosti (křivky svítivosti, izoluxy). Umožňuje měřit svítivost v různých rovinách a úhlech. Nejvíce se využívá souřadnicového systému rovin C- γ (Obr. 4.5), kde C reprezentuje úhel od poloroviny hlavní (fotometrické) osy, která je kolmá k vyzařovací ploše svítidla (nebo fotometrického středu SZ). [4]



Obr. 4.5: Křivky svítivosti v rovinách v systému C- γ [22]

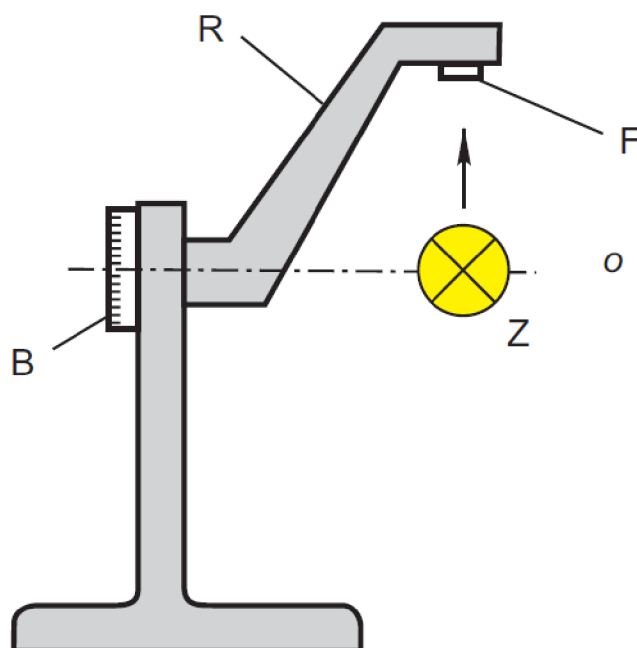
V katalozích se udávají přepočtené křivky svítivosti na světelný tok 1000 lm, kvůli objektivnosti vůči skutečnému světelnému toku SZ a porovnávání různých SZ mezi sebou. [4] Výsledná vykreslená vztažená svítivost SZ společně s vyznačenou křivkou svítivosti na C- γ polorovině je znázorněna na Obr. 4.6.



Obr. 4.6: Prostorové vyznačení svítivosti s izoluxou na C- γ polorovině [23]

Křivky svítivosti jsou důležitým fotometrickým parametrem pro návrhy osvětlovacích soustav. U jejich měření se využívá goniofotometru, který umožňuje měřit SZ v různých úhlech a rovinách. Konstruuje se v třech uspořádáních, a to: otočný zdroj s pevným fotometrem, pevný zdroj s otočným fotometrem, anebo pevný zdroj i fotometr a otočný zrcadlový systém. [21]

První zmíněný systém není vhodný pro laboratorní měření z důvodu vlivu různého svícení SZ na různých polohách. Druhá konstrukce, která se v této práci bude využívat, je určena pouze pro objektivní měření. Zde je fyzikální čidlo upevněno na rameni goniofotometru, které obíhá okolo nepohyblivého SZ. Výhodou je, že SZ je umístěn v provozní poloze a nepůsobí na něj zbytečné rušivé vlivy. [21]



Obr. 4.7: Náčrt konstrukce goniofotometru s pevným SZ a otočným fotometrem [21]

Na Obr. 4.7 je znázorněn náčrt konstrukce goniofotometru s pevným měřeným světelným zdrojem Z a otočným ramenem R s fixovaným měřícím čidlem F. Rameno se kolem osy o , kde je umístěn zdroj Z, otáčí dle úhlu nastaveného na bubínku B. Měřená křivka svítivosti se mění natočením zdroje Z v různých fotometrických rovinách. Díky tomu jsme schopni změřit průměty v polárních souřadnicích polorovin C - γ . Osa této poloroviny je totožná se směrem vztažné svítivosti I_0 a je kolmá k hlavní vyzařovací ploše SZ. [21] [2]

Třetí zmíněná konstrukce goniofotometru umožňuje prodloužit fotometrickou vzdálenost mezi svítidlem a měřícím čidlem, přes zrcadlový systém. Zvětšení této vzdálenosti při správných podmínkách pro svítidla bodového typu, což zapříčiní přesnější měření. Nastavování těchto podmínek je ale náročné a jsou za potřebí kvalitní optické zrcadla, které se časem opotřebovávají a zvyšují tím svůj činitel absorpce, čímž ovlivňují nejistotu měření. [2]

Všechny uspořádání goniofotometru musí být dostatečně tuhá, aby se předešlo různým nežádaným výkyvům, které by zapříčinily chybu měření. [21]

4.4 Měření křížových charakteristik

Křížové charakteristiky vyjadřují průběh fotometrických a elektrických parametrů SZ při změně napájecího napětí. Pro dobré čtení charakteristik se parametry uvádí v relativních hodnotách kde 100 % představuje hodnota měřená při nominální hodnotě napájecího napětí. Střed charakteristiky je umístěn v bodě 100 % obou relativních os, kde se protínají všechny závislosti. [15]

Parametry mohou být závislé nejen na napájecím napětí, ale i na okolní teplotě, době svícení SZ, poloze SZ, celkové době provozu od prvního zapnutí apod., proto je nutné zdůraznit že výsledné charakteristiky jsou kvalitativním a kvantitativním ukazatelem provozu zdroje za daných podmínek laboratorního měření. [15]

Parametry měřené v této práci:

- I , celkový proud odebíraný SZ, lze měřit přímo zapomocí přístrojů měřících efektivní hodnoty proudu (trueRMS).
- P , činný příkon odebíraný SZ s předřadníkem, je závislý na proudu proto lze měřit přímo zapomocí přístrojů měřících efektivní hodnoty (trueRMS).
- Q , jalový příkon odebíraný SZ s předřadníkem je závislý na proudu proto lze měřit přímo zapomocí přístrojů měřících efektivní hodnoty (trueRMS).
- S , zdánlivý příkon odebíraný SZ s předřadníkem je závislý na proudu proto lze měřit přímo zapomocí přístrojů měřících efektivní hodnoty (trueRMS).
- Φ , světelný tok měřený v kulovém integrátoru, u kterého musíme znát převodní konstantu v jednotkách (lm/mV), pro zjištění nominální hodnoty při jmenovitém síťovém napětí.
- M_z , měrný výkon světelného zdroje, který znázorňuje účinnost přeměny elektrické energie na světelnou. Popis výpočtu je popsán v podkapitole 2.1.5.
- η , elektrická účinnost udávající poměr činného příkonu vůči zdánlivému příkonu SZ.
- $\cos\varphi$, účinník popisující poměr činného výkonu ku zdánlivému výkonu pro první harmonickou složku signálu. Popsáno v podkapitole 2.2.1.
- PF , skutečný účinník vyjadřující část zdánlivého příkonu odebírajícího SZ jako činný příkon. Popsáno v podkapitole 2.2.2.

5 Praktická část

Veškeré měření probíhalo v laboratoři světelné techniky FEKT VUT v Brně. Laboratoř je uzpůsobena pro měření fotometrických parametrů a poskytuje profesionální vybavení, ze kterého se bude využívat metod a přístrojů pospaných v kapitole 4.

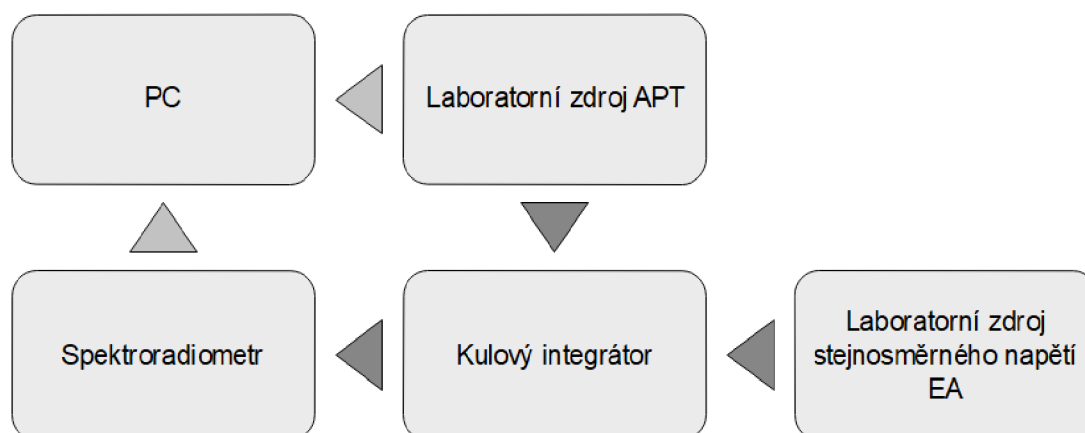
5.1 Měření na kulovém integrátoru

Teoretický úvod metodiky měření na kulovém integrátoru je popsán v kapitole 0.

5.1.1 Schéma zapojení

Schéma zapojení se skládá z několika zařízení, a to kulového integrátoru, spektroradiometru, laboratorního zdroje APT, laboratorního zdroje EA a PC, jež zpracovává data průběžně měřené spektroradiometrem a zdrojem APT.

Spektroradiometr JETI specbos 1211UV měří snímané vyzařované spektrum po jednotlivých vlnových délkách v rozsahu od 350 do 1000 nm po kroku měření 1 nm. Po změření posílá data do PC využívající program JETI LiVal určený přímo pro řízení a zpracování měření zkalibrovaného přístroje. Program má mnoho funkcí, ze kterých bylo využíváno hlavně postupného vykreslování změřeného spektra a zobrazování průběžné hodnoty světelného toku. Napájení a měření elektrických veličin SZ je řešeno připojením do stabilizovaného laboratorního zdroje APT 300XAC. Ten využívá tzv. čtyřvodičovou měřicí metodu, která eliminuje přechodové odpory a odpor přívodních vodičů. Tento laboratorní přístroj konstantně napájí měřený SZ a je ovládán stejnojmenným programem přes PC, kde se monitorují měřené elektrické parametry. Napájení korekčního zdroje v kulovém integrátoru je provedeno laboratorním zdrojem stejnosměrného napětí EA, který udržuje konstantní hodnotu příkonu a tím zapříčiní i konstantní distribuci světelného toku korekčního zdroje. Schéma měřicí soustavy je znázorněno na Obr. 5.1.



Obr. 5.1: Schéma měřicí soustavy, zdroj: autor

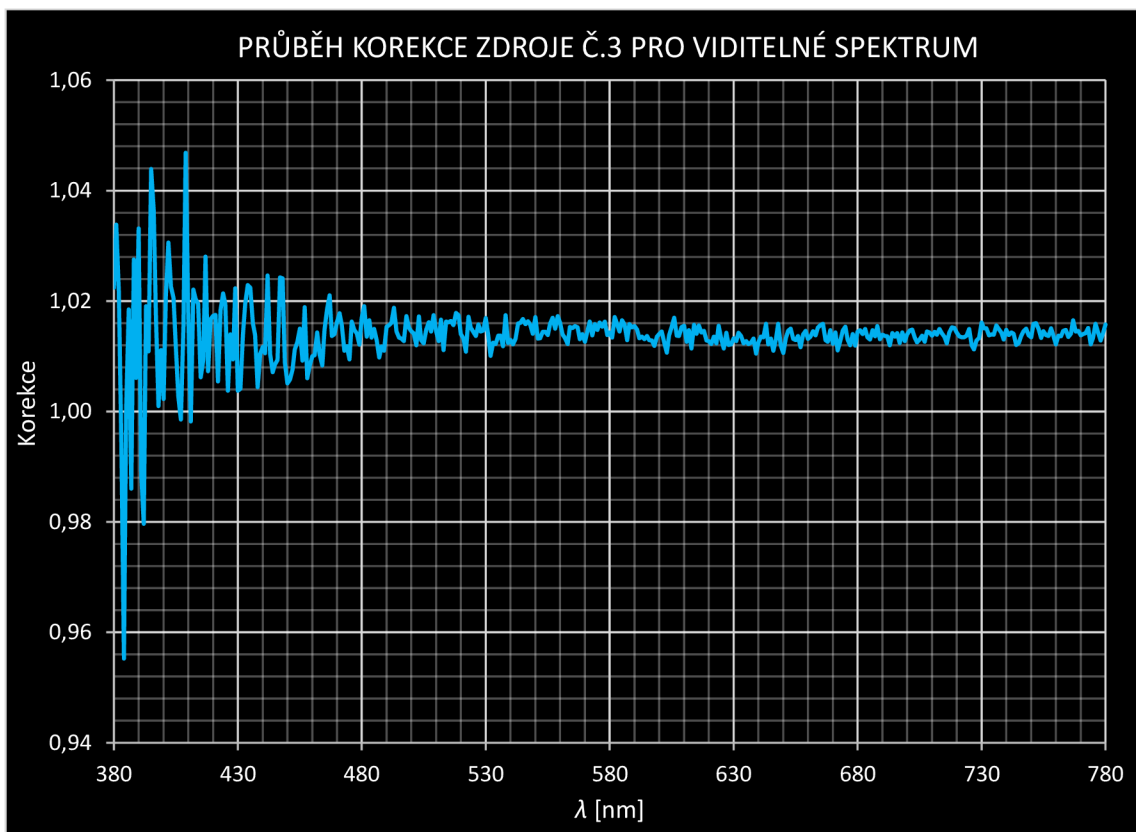
5.1.2 Korekce

Při difúzním odrážení v kulovém integrátoru dochází k absorpci části světelného toku neaktivními plochami (např.: napájecí kabel s objímkou světelného zdroje), které se nachází v kulovém integrátoru. Tuto chybu pohlcení je nutné korigovat za pomoci tzv. korekce. [15] Vlastní měření se provádí poměrovou metodou, popsána v kapitole

Měření světelného toku na kulovém integrátoru0.

V uzavřeném integrátoru, bez vloženého světelného zdroje, se nejdříve změří spektrum světla korekčního zdroje světla (žárovky) zahřátého do pracovních podmínek (na teplotu kdy distribuuje konstantní světelný tok). Po tomto měření se umístí světelný zdroj, jenž je instalován do objímky s napájecím kabelem (bez přísunu energie), přesně doprostřed kulového integrátoru a znovu se změří korekční hodnoty. Výsledné korekční hodnoty pro změřené vlnové délky získáme vydělením zprůměrovaných hodnot několika měření pro integrátor a integrátor s instalovaným světelným zdrojem.

Korekce by měla být vždy větší než 1, bohužel na kratších vlnových délkách měřeného spektra (nejčastěji v rozmezí 350–450 nm) občasně dosahuje korekce hodnotám menších než 1. Tyto výkyvy jsou zapříčiněny nízkými hodnotami generovaného signálu na fotočlátku spektrometru (znázorněno na Obr. 4.1). Pro větší vlnové délky se průběh korekce postupně ustaluje.

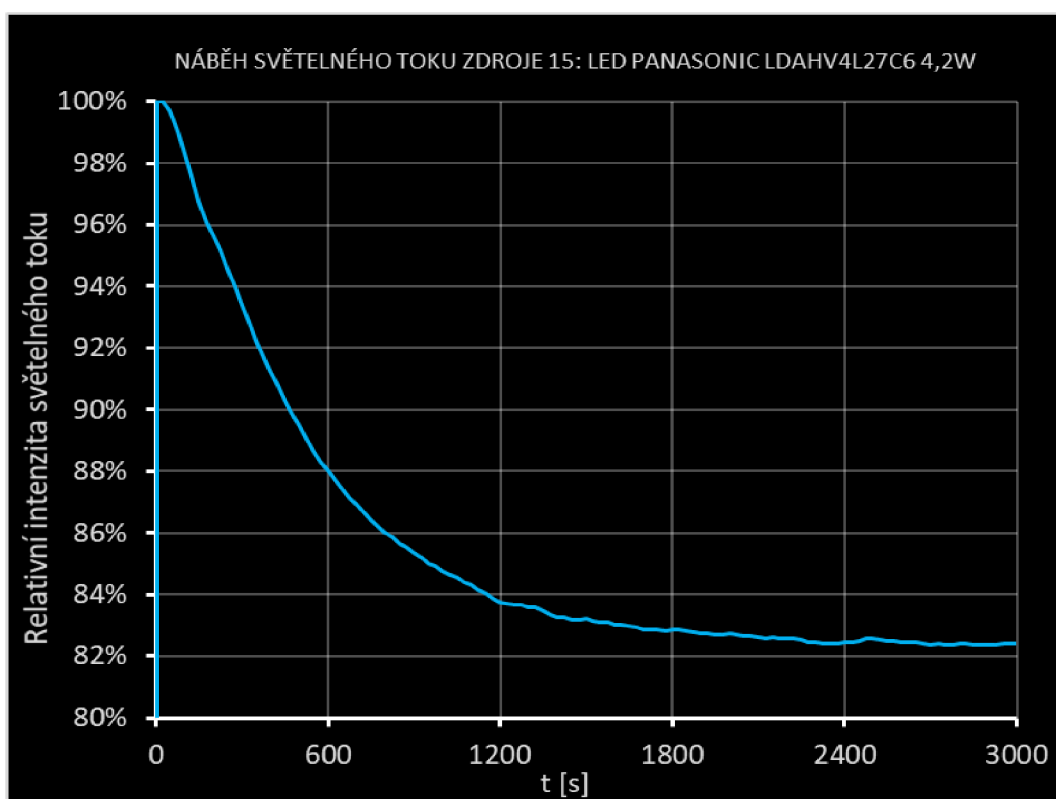


Obr. 5.2: Průběh korekce zdroje č.3 pro viditelné spektrum, zdroj: autor

5.1.3 Měření světelného toku

Měření spektra světelného toku probíhá v uzavřeném kulovém integrátoru, který obsahuje vložený světelný zdroj zahořen do pracovních podmínek. Takový zdroj je uveden na teplotu, kdy distribuuje konstantní světelný tok za určitou dobu zahoření.

Tato doba je různě dlouhá dle typu SZ. Pro tepelné to je pár jednotek minut, u výbojových zdrojů 20 a více minut a pro LED zdroje 25 minut a více (pospáno v kapitole 0). Na Obr. 5.3 je zobrazen náběh světelného toku do ustálení na konstantní nominální hodnotu pro LED světelný zdroj č.15 PANASONIC LDAHV4L27C6. Délka doby zahoření tohoto zdroje trvala 50 minut.



Obr. 5.3: Náběh světelného toku do ustálení na nominální hodnotu, zdroj: autor

Dále je SZ důkladně očištěn od nečistot, které by ovlivňovali distribuci světla zdroje. Veškerá fotometrická měření jsou kontrolována a monitorována v programu JETI LiVal, jenž je spojen se spektrometrem. Ten měří v několika časových intervalech (v tomto měření byl nastaven interval po 25 sekundách) jednotlivé hodnoty spektra, které program zpracovává. Světelný zdroj je napájen zdrojem APT, který současně měří elektrické parametry. Data jsou průběžně zaznamenávána programem APT na PC. Na displeji zdroje lze sledovat momentální měřené hodnoty elektrických parametrů. Po ustálení hodnot a zahoření SZ se vybralo posledních 10

změřených kroků. Ty se poté zpracovávali způsobem popsaným v následující podkapitole.

5.1.4 Zpracování měření

Veškerá naměřená data na kulovém integrátoru jsou sofistikovaně zpracována v programu Microsoft Excel.

Posledních 10 změřených kroků po zahoření SZ bylo zprůměrováno, pro získání přesnějších hodnot. Pro správnou hodnotu naměřeného spektra bylo nutno provést korekci a to tak, že se zjištěné hodnoty korekce vynásobí hodnotami spektra zvláště pro každou vlnovou délku. Z výsledného spektra byla zjištěna hodnota světelného toku skalárním součinem součtů spektra a hodnotami kolorimetrického koeficientu $\bar{y}(\lambda)$ normalizovaného pozorovatele vynásobeným hodnotou ideálního monochromatického zdroje.

Světelný tok Φ pak slouží k dopočítání ostatních parametrů jako trichromatické složky X, Y, Z a následně i souřadnice x, y, u' a v' , jejichž postup výpočtu je vysvětlen v kapitole 2.1.3.1.

Hodnota vzdálenosti barevné souřadnice světla od čáry teplotních zářičů D_{uv} byla vypočtena zapomocí aproximací trichromatických souřadnic a pevně daných koeficientů rovnicemi

$$L_{FP} = \sqrt{(u - 0,292)^2 + (v - 0,24)^2} \quad (5.1)$$

$$a = \cos^{-1} \frac{u - 0,292}{L_{FP}} \quad (5.2)$$

$$L_{BB} = \sum_{x=0}^6 k_x \cdot a^x \quad (5.3)$$

$$D_{uv} = L_{FP} - L_{BB} \quad (5.4)$$

, kde L_{FP}, L_{BB}, a jsou aproximační formule a k_x jsou hodnoty koeficientů formule L_{BB} . Kladná hodnota D_{uv} značí, že se barevná souřadnice SZ nachází nad čarou teplotních zářičů, u záporných hodnot se souřadnice nachází pod čarou. Tento výpočet platí jen pro SZ s teplotou chromatičnosti od 2 500 – 20 000 K. [8]

Výsledná hodnota všeobecného indexu podání barev R_a byla odečtena z programu JETI LiVal. Náhradní teplota chromatičnosti byla spočtena podle McCamyho krychlové aproximace

$$n = \frac{(x - x_e)}{(y - y_e)} \quad (5.5)$$

, kde n je hodnota sklonu čáry, od čáry teplotních zářičů s konstantami x_e (0,3366) a y_e (0,1735). Výsledná náhradní hodnota chromatičnosti je dána vzorcem, [24]

$$T_c = (-449 \cdot n^3) + (3525 \cdot n^2) - (6823,3 \cdot n) + 5520,33 \quad (5.6)$$

Hodnoty T_c a R_a byly zkontrolovány zapomocí komplexního souboru, z Laboratoře světelné techniky Technické Univerzity v Helsinkách [25]. Tyto hodnoty se lišili maximálně v desítkách K, nicméně je nutné poznamenat, že existují i přesnější tvary MacAmyho rovnice. Soubor vyžaduje měřené spektrum po kroku $\frac{1}{3} \text{ nm}$, proto bylo nutné vložit lineárně interpolované hodnoty spektra tak, aby odpovídali vlnovým délkám využívaných souborem.

Všechny elektrické parametry (U , I , P , Q , S , PF), krom účinníku $\cos\varphi$ byly změřeny laboratorním zdrojem APT. Účinník byl vypočten podílem činného ku zdánlivému výkonu dle vzorce (2.10).

Měrný výkon M_z světelného zdroje byl vypočten podílem hodnoty světelného toku ku činnému výkonu světelného zdroje dle vzorce (2.9).

5.1.4.1 Seznam světelných zdrojů a tabulka změřených a vypočtených hodnot

Tabulka 1: Soupis měřených světelných zdrojů

Číslo označení	Typ zdroje	Popis/Výrobní ozn.	Výrobce	P_n [W]	Φ_n [lm]	I_n [A]	T_c [K]
1	Teplotní	Žárovka čirá (A46)	LEUCI	60	-	0,26	-
2	Teplotní	Žárovka červená (A46)	LEUCI	25	-	0,10	-
3	Teplotní	Žárovka oranžová (A46)	LEUCI	25	-	0,10	-
4	Teplotní	Žárovka žlutá (A46)	LEUCI	25	-	0,10	-
5	Teplotní	Žárovka modrá (A46)	LEUCI	25	-	0,10	-
6	Teplotní	Žárovka matná (A55)	PHILIPS	60	-	0,26	2700
7	Teplotní	Žárovka čirá (A55)	OSRAM	60	700	0,26	-
8	Teplotní	Hal. žárovka čirá (A55)	PHILIPS	45	-	0,20	-
9	Teplotní	Hal. žárovka čirá (A55)	OSRAM	40	-	-	-
10	LED	LED 4WE14	FLAIR	4	350	-	-
11	LED	LED 4WE27 Twist	FLAIR	4	420	-	2700
12	LED	LED SUPERSTAR CL A75 adv 827 E27	OSRAM	14,5	1055	0,07	2700
13	LED	LED BL276527-1	TESLA	6	700	-	2700
14	LED	LED 12E27A60 Endura	PHILIPS	12	806	-	-
15	LED	LED-LDAHV4L27C6	PANASONIC	4,4	210	-	2700
16	LED	LED-PARATHOM CLA80061	OSRAM	2	100	-	-
17	LED	LED-PARATHOM CLA80059	OSRAM	2,3	117	-	-
18	LED	LED BULB (A65)	Z-LIGHT	7	-	-	-
19	LED	LED BULB (A65)	Z-LIGHT	5	-	-	-
20	Výbojový	Komp. zářivka duluxstar minitwist	OSRAM	20	1300	0,20	2700
21	Výbojový	Komp. zářivka duluxstar stick	OSRAM	20	1200	-	2700
22	Výbojový	Komp. zářivka	MEGAMAN	15	800	0,13	4000

Tabulka 2: Změřené a vypočtené hodnoty fotometrických a elektrických parametrů světelných zdrojů

Číslo označení SZ	Φ	Mz	Tc	Ra	X	Y	Z	x	y	u'	v'	D_{uv}	U	I	P	Q	S	$\cos\varphi$	PF	Poznámka
[-]	[lm]	[lm/W]	[K]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[V]	[A]	[W]	[VAr]	[VA]	[-]	[-]	
1	585,3	9,8	2702	100	0,96	0,86	0,27	0,46	0,41	0,26	0,35	-0,0842	230,2	0,26	59,67	0,00	59,67	1,00R	1,00	Př. výpočtu
2	0,8	0,1	-	-	0,00	0,00	0,00	0,66	0,30	0,51	0,34	-	230,2	0,10	23,67	0,00	23,67	1,00R	1,00	
3	69,2	2,9	-	-	0,15	0,10	0,00	0,59	0,40	0,35	0,36	-	230,2	0,10	23,88	0,00	23,88	1,00R	1,00	
4	141,9	5,9	2302	89	0,24	0,21	0,02	0,52	0,45	0,28	0,37	-	230,2	0,11	24,15	0,00	24,15	1,00R	1,00	
5	5,4	0,2	21620	64	0,01	0,01	0,01	0,22	0,27	0,15	0,28	-	230,2	0,11	24,38	0,00	24,38	1,00R	1,00	
6	657,4	11,1	2700	100	1,08	0,96	0,30	0,46	0,41	0,26	0,35	0,0842	230,2	0,26	59,65	0,00	59,65	1,00R	1,00	
7	677,2	10,5	2753	100	1,10	0,99	0,32	0,46	0,41	0,26	0,35	-0,0819	230,1	0,28	64,25	0,00	64,25	1,00R	1,00	
8	601,8	13,6	2854	100	0,97	0,88	0,31	0,45	0,41	0,26	0,35	-0,0778	230,2	0,19	44,55	0,00	44,55	1,00R	1,00	
9	454,2	11,39	2770	100	0,74	0,67	0,23	0,45	0,41	0,26	0,35	-0,0808	230,2	0,17	39,91	0,00	39,91	1,00R	1,00	
10	428,7	122,5	2676	86	0,70	0,63	0,17	0,47	0,42	0,26	0,36	0,0854	230,2	0,03	3,70	-4,82	7,53	0,61C	0,49	
11	425,8	121,6	2627	87	0,70	0,62	0,17	0,47	0,42	0,27	0,35	0,0876	230,2	0,03	3,71	-4,82	7,55	0,61C	0,49	
12	985,6	75,8	2826	88	1,60	1,44	0,55	0,45	0,40	0,26	0,35	-0,0791	230,1	0,06	13,00	-2,80	13,30	0,98C	0,98	
13	577,5	94,7	2789	83	0,96	0,85	0,38	0,44	0,39	0,26	0,34	-0,0812	230,1	0,06	6,30	-8,80	12,85	0,59C	0,49	
14	858,7	67,6	2777	85	1,40	1,26	0,45	0,45	0,41	0,26	0,35	-0,0810	230,1	0,07	12,70	-8,10	15,10	1,00C	0,84	
15	175,6	45,0	2699	87	0,29	0,26	0,09	0,46	0,41	0,26	0,35	-0,0843	230,1	0,03	4,18	-2,30	6,23	0,87C	0,65	
16	112,2	62,4	2989	69	0,18	0,16	0,06	0,44	0,41	0,25	0,35	0,0722	230,1	0,02	2,00	-0,09	4,49	1,00C	0,46	
17	120,5	60,3	6189	81	0,17	0,18	0,19	0,32	0,32	0,20	0,31	-0,0206	230,1	0,02	2,15	-0,12	4,58	1,00C	0,48	
18	918,5	131,2	2748	85	1,49	1,34	0,43	0,46	0,41	0,26	0,35	-0,0822	230,1	0,05	7,00	-9,60	11,90	1,00C	0,59	
19	735,0	144,1	2745	87	1,19	1,08	0,33	0,46	0,41	0,26	0,35	0,0822	230,1	0,04	5,10	-7,60	9,20	1,00C	0,55	
20	1327,5	69,3	2818	84	2,13	1,94	0,61	0,45	0,41	0,26	0,35	0,0791	230,1	0,14	19,16	10,20	33,76	0,89L	0,56	
21	1191,9	61,09	2767	85	1,92	1,75	0,54	0,46	0,41	0,26	0,35	0,0813	230,1	0,14	19,51	9,01	33,05	0,91L	0,60	
22	745,8	48,0	3691	85	1,10	1,09	0,69	0,38	0,38	0,23	0,34	0,0456	230,1	0,11	15,53	8,09	25,31	0,89L	0,61	

5.1.4.2 Příklad výpočtu tabulky 2, řádek 3:

a) Výpočet světelného toku:

$$\Phi = 683 \cdot \sum_{\lambda=380}^{780} \Phi_{\lambda}(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda)$$

, kde Φ_{λ} jsou naměřené hodnoty spektra vynásobená korekčním činitelem k .

$$\Phi = 683 \cdot (0,857) = 454,2 \text{ lm}$$

b) Výpočet měrného výkonu:

$$M_Z = \frac{\Phi}{P} = \frac{454,2}{59,67} = 9,81 \text{ lm/W}$$

c) Výpočet trichromatických složek a aproximací:

$$X = \sum_{\lambda=380}^{780} \Phi_{\lambda}(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) = 0,96; Y = \sum_{\lambda=380}^{780} \Phi_{\lambda}(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) = 0,86; Z = \sum_{\lambda=380}^{780} \Phi_{\lambda}(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) = 0,27$$

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} = \frac{0,96}{0,96 + 0,86 + 0,27} = 0,46$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} = \frac{0,86}{0,96 + 0,86 + 0,27} = 0,41$$

$$u' = \frac{4 \cdot X}{X + 15 \cdot Y + 3 \cdot Z} = \frac{4 \cdot 0,96}{0,96 + 15 \cdot 0,86 + 3 \cdot 0,27} = 0,26$$

$$v' = \frac{9 \cdot Y}{X + 15 \cdot Y + 3 \cdot Z} = \frac{9 \cdot 0,86}{0,96 + 15 \cdot 0,86 + 3 \cdot 0,27} = 0,23$$

$$u = u' = 0,26$$

$$v = v' \cdot \frac{2}{3} = 0,35 \cdot \frac{2}{3} = 0,23$$

$$L_{FP} = \sqrt{(u - 0,292)^2 + (v - 0,24)^2} = \sqrt{(0,26 - 0,292)^2 + (0,23 - 0,24)^2} = 0,0303$$

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{u - 0,292}{L_{FP}} = \cos^{-1} \frac{0,26 - 0,292}{0,0303} = 2,9552$$

$$L_{BB} = \sum_{x=0}^6 k_x \cdot \alpha^x = -0,0062 \cdot 2,9552^6 + 0,0894 \cdot 2,9552^5 - 0,5180 \cdot 2,9552^4 + 1,5317 \cdot 2,9552^3 - 2,4244 \cdot 2,9552^2 + 1,9259 \cdot 2,9552^1 - 0,4711 = 0,1145$$

$$D_{uv} = L_{FP} - L_{BB} = 0,0303 - 0,1145 = -0,0842$$

d) Výpočet náhradní teploty chromatičnosti:

$$n = \frac{(x - x_e)}{(y - y_e)} = \frac{(0,46 - 0,332)}{(0,41 - 0,186)} = 0,5674$$

$$T_c = (-449 \cdot n^3) + (3525 \cdot n^2) - (6823,3 \cdot n) + 5520,33$$

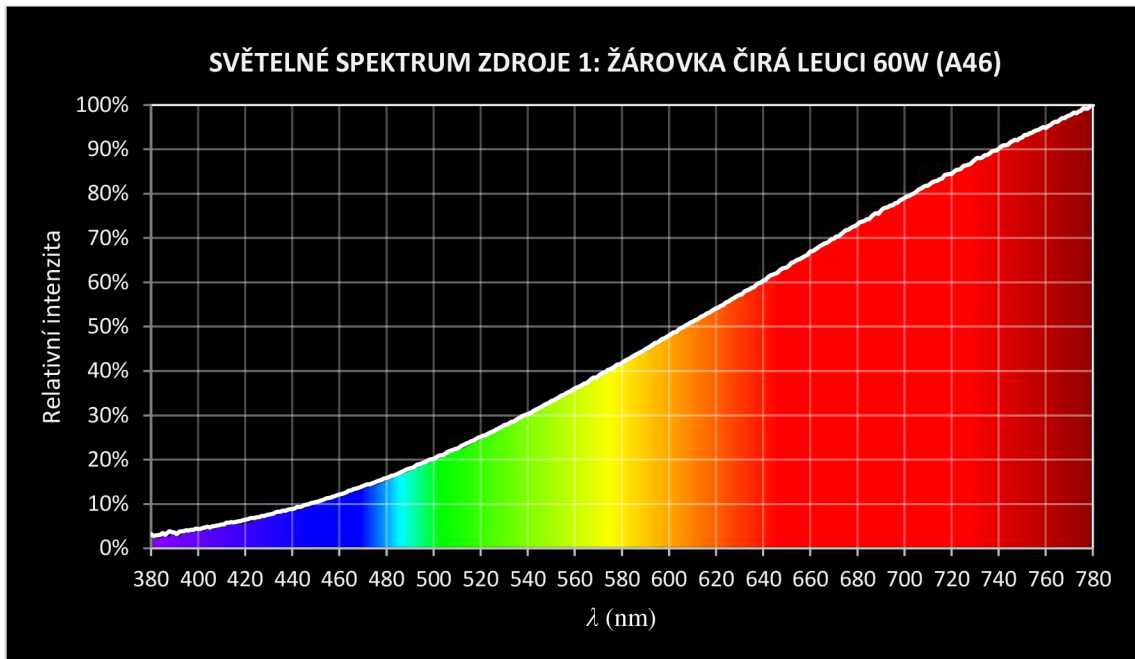
$$T_c = (-449 \cdot 0,5674^3) + (3525 \cdot 0,5674^2) - (6823,3 \cdot 0,5674) + 5520,33$$

$$T_c = 2702 \text{ K}$$

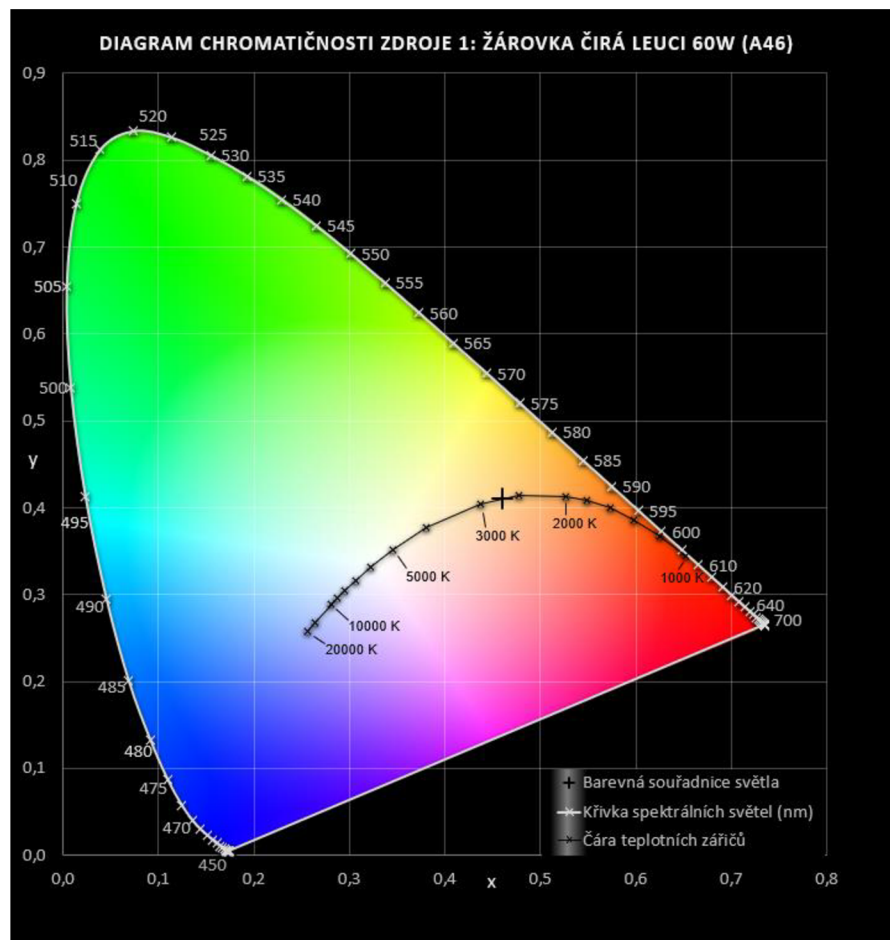
e) Výpočet účinníku:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{59,67}{59,67} = 1,00R$$

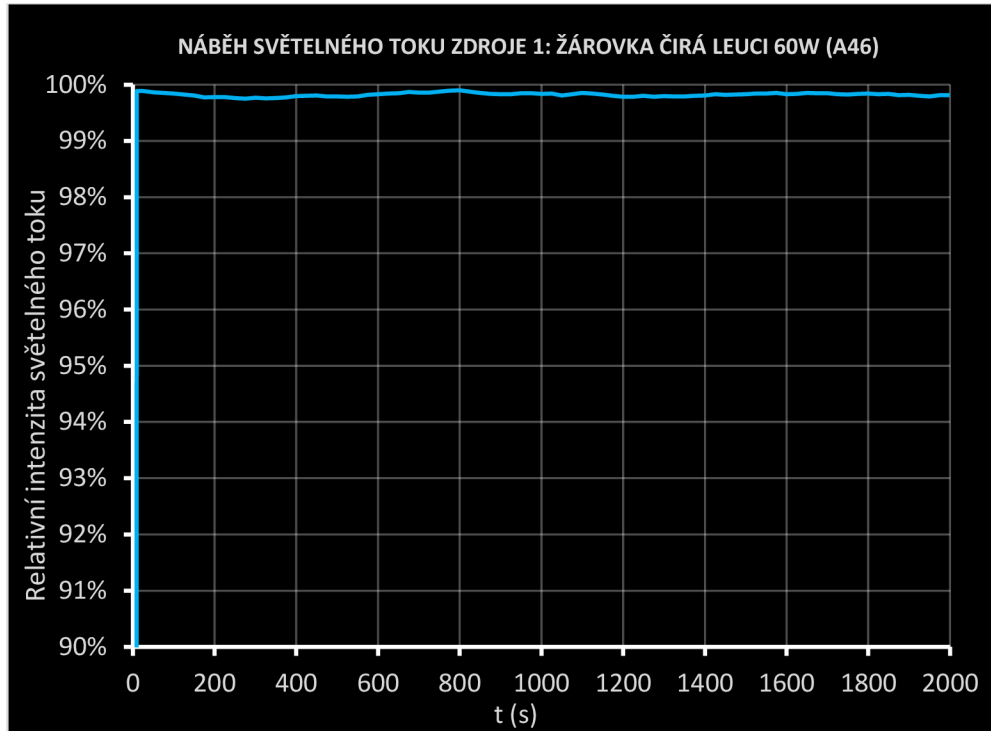
5.1.4.3 Grafické zpracování



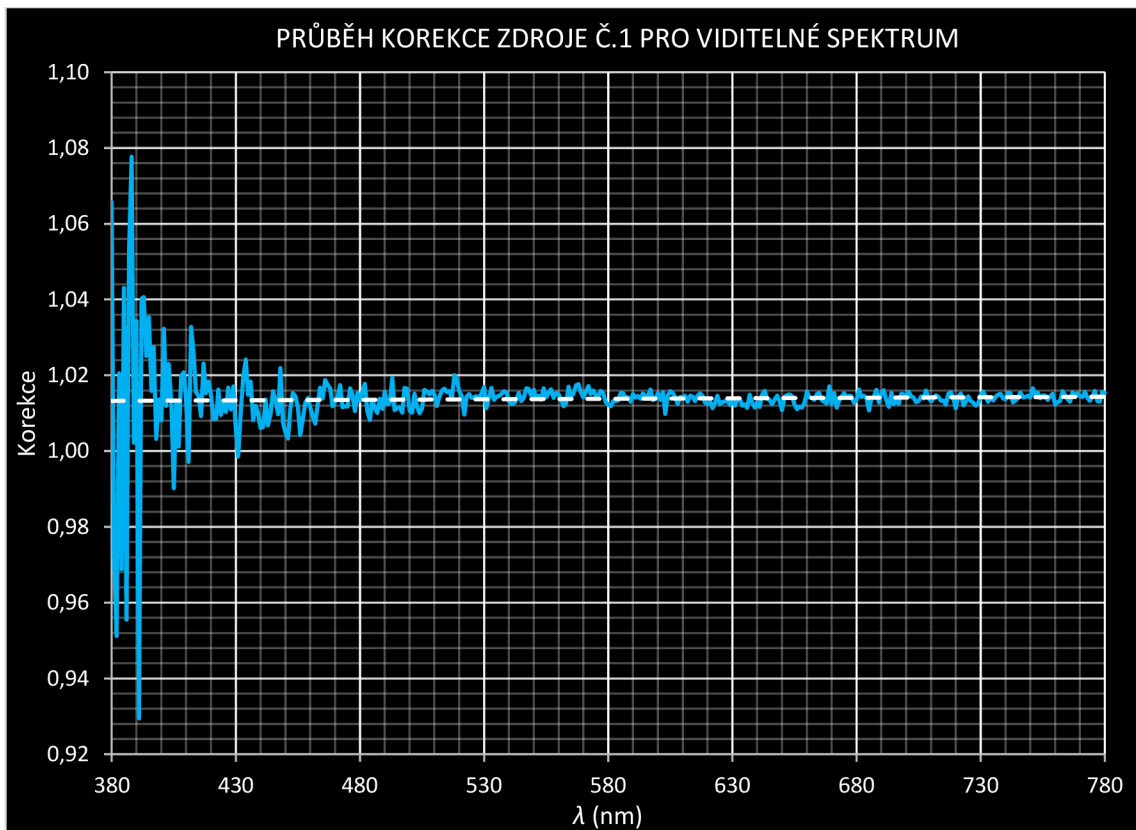
Obr. 5.4: Změřené světelné spektrum světelného zdroje č.1, zdroj: autor



Obr. 5.5: Zpracovaný diagram chromatičnosti světelného zdroje č.1, zdroj: autor



Obr. 5.6: Změřený náběh světelného toku světelného zdroje č.1, zdroj: autor



Obr. 5.7: Změřený průběh korekce světelného zdroje č.1, zdroj: autor

5.1.5 Seznam použitých přístrojů a zařízení

Tabulka 3: Seznam použitých přístrojů a zařízení

Název	Výrobce	Typ	Hlavní parametry a funkce	Evidenční číslo
Kulový integrátor	-	-	Průměr integrátoru: D = 2,5 m	000000313808-0000
Spektro-radiometr	JETI Technische Instrumente GmbH	specbos 1211UV	Rozsah měřitelného spektra: 230 nm – 1000 nm Optické rozlišení: 4,5 nm Krok měření vlnové délky: 1 nm Digitální elektronické rozlišení: 16 bit ADC Měřitelné hodnoty: - Spektrum zářivého toku - Celkový zářivý tok - Trichromatické souřadnice (x, y; u', y')	000000319528-0000
Laboratorní zdroj stejnosměrného napětí	EA	PSI 5200- 10A	Stejnoseměrné napětí na výstupu: až 200 V Stejnoseměrný proud na výstupu: až 10 A Výkon: až 640 W Funkce udržení konstantního výkonu	01619
Laboratorní zdroj APT	APT	300XAC	Střídavé napětí na výstupu: 5–300 V Maximální zdánlivý výkon: 1 kVA	-
PC	-	Stolní počítač	Funkce zprostředkování programu pro monitoring a zápis měření dat spektrometru a laboratorního zdroje APT	-

5.1.6 Laboratorní podmínky

Měření bylo časově náročné a probíhalo v několika dnech, ve kterých byly odlišné laboratorní podmínky.

Nicméně jejich hodnoty nepřesahovali hranice, které by byly v rozporu s rozsahem doporučených provozních podmínek pro výše uvedené přístroje. Teplota okolí se pohybovala při všech měřeních kolem $23 \pm 0,5^\circ\text{C}$. Relativní vlhkost se pohybovala od 30 do 37 % a tlak od 1005 do 1029 hPa.

5.2 Měření na goniofotometru

Teoretický úvod metodiky měření na kulovém integrátoru je popsán v kapitole 4.3.

V tomto měření je použito stejné značení měřených SZ jako při měření na kulovém integrátoru (Tabulka 1).

5.2.1 Schéma zapojení

Schéma zapojení je složeno z goniofotometru, luxmetru s fotodetektořem, tyče pro upevnění SZ s patičí E27, laboratorního zdroje APT a PC (Obr. 5.8).

Měření je řízeno přes PC programy APT a GPM. Program s označením GPM (neboli **G**onio**P**hoto**M**eter) slouží pro manipulaci s prototypem goniofotometru

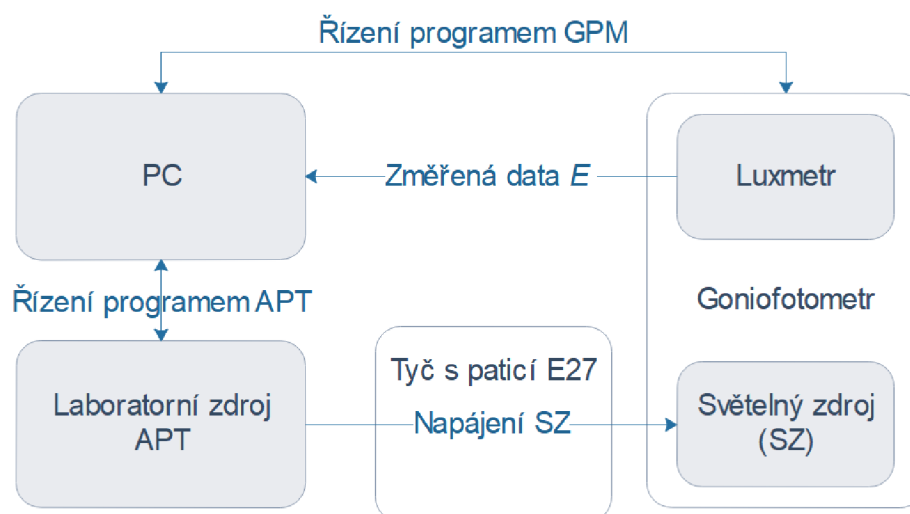
v laboratoři. Goniofotometr je řešen konstrukcí s pevným SZ a otočným fotodetektozem. Konstrukce goniofotometru je díky vodováhám a pomocným laserům v laboratoři přesně umístěna a nastavena na počáteční měřicí fotometrickou polohu.

Luxmetr je upevněný v konstrukci goniofotometru a jeho fotodetektor je pevně a přesně umístěn na pohyblivém ramenu. Umístění je dáno lasery, které značí přesný střed na zavěšeném SZ. Použitý fotodetektor měří s třídou přesnosti L v rozsahu od 1 mlx až do 360 klx. Napájení luxmetru je řešeno zapojením do zařízení goniofotometru, jenž je připojen na síťové napětí.

Programem APT se řídí laboratorní zdroj APT 300XAC, jenž po nastavení vstupních parametrů napájí SZ a kontinuálně měří jeho elektrické veličiny. Připojení SZ do stabilizovaného laboratorního zdroje je řešeno tzv. čtyřvodičovou měřicí metodou, která eliminuje přechodové odpory a odpor přívodních vodičů.

Napájecí kabel je veden přes upevňovací tyč s patičí E27, do které se po uchycení tyče instaluje SZ. Patice je umístěna na závitové tyči, takže je možno měnit celkovou délku tyčového zařízení. To je užitečné hlavně pro zkorigování fotometrické vzdálenosti mezi fotodetektozem a bodem středu svícení SZ. Tato vzdálenost je důležitá pro přepočtení změřených hodnot osvětlenosti E luxmetrem na hodnoty svítivosti I . Přepočtení se dá provést po měření v programu GPM, nastavením fotometrické vzdálenosti do vlastností měření.

Používaná konstrukce goniofotometru není úplně dokonalá, jelikož musíme měřený SZ nějakým způsobem napájet a pevně držet na stejné pozici. S touto nevýhodou je nutné počítat a před počátkem měření zjistit v jakých polárních souřadnicích dochází ke kolizi pohyblivého ramena a upevněním SZ. Tyto souřadnice je nutné z měření na goniofotometru vynechat a dopočítat je po změřením přes interpolaci dat vedlejších stupňů souřadnic.



Obr. 5.8: Blokové schéma zapojení goniofotometru, zdroj: autor

5.2.2 Postup měření čar svítivosti

- 1) Zkontrolovat za pomoci nastavených laserů a vodováh, zda konstrukce goniofotometru je srovnána na místě.
- 2) Umístit luxmetr do pohyblivé konstrukce goniofotometru a upevnit fotodetektor luxmetru na otočném rameni nastaveném v nulové poloze (v dolní poloze kde jsou souřadnice C- γ [0;0]) tak, aby měl být umístěn přesně uprostřed překřizujících se laserů.
- 3) Upevnit tyč s paticí E27 na stropní úchyty, kde se nejprve upevní napájecí kabel z laboratorního zdroje APT na samostatnou úchytku, která zabraňuje kolizi kabelu s konstrukcí goniofotometru. Až poté upevnit tyč na úchyt umístěný přímo nad středem goniofotometru.
- 4) Namontovat SZ do patice a zkontrolovat za pomoci laserů, jestli je světelný střed SZ uprostřed překřizujících se laserů z každé strany. Pokud ne, je jiná fotometrická vzdálenost mezi detektorem luxmetru a středem svícení. Je nutné sundat tyč držící SZ a změnit její délku tak, aby odpovídala nastavené fotometrické vzdálenosti. Pokud ne mohlo by dojít k chybnému měření anebo ke kolizi goniofotometru s tyčí držící SZ.
- 5) Změřit metrem nastavenou fotometrickou vzdálenost.
- 6) Zapnout goniofotometr a připojit k němu napájení luxmetru.
- 7) Zapnout luxmetru a zkontrolovat funkci detektoru.
- 8) Zapnout PC a spustit program s označením GPM (GonioPhotoMeter) a zkontrolovat propojení mezi těmito zařízeními.
- 9) V programu nastavit označení měřeného zdroje, a hlavně změřenou fotometrickou vzdálenost z kroku 5, kterou bude program používat při přepočtu změřených hodnot osvětlení E (lx) do hodnot svítivosti I (cd).
- 10) Ve zmiňovaném programu zkoušejte nastavit hodnoty C- γ tak, aby byly zjištěny měřicí rozsahy souřadnic, které nezasahují do prostoru tyče se SZ.
- 11) Zjištěné rozsahy v programu nastavit s krokem 5° pro C souřadnici a s krokem 2° pro γ souřadnici (Kroky se dají libovolně měnit po celých stupních, záleží však na tom jak přesné nebo rychlé měření je požadováno. Pro dané kroky trvá měření 8h 23m + doba zahoření SZ).
- 12) Vymazat souřadnice z kroku 10, pro které by nastala kolize s konstrukcí goniofotometru.
- 13) Připravit prostor měření kolem goniofotometru tak, aby nedocházelo ke zbytečnému odrazu světelného toku zdroje do čidla luxmetru upevněném na goniofotometru.
- 14) Zapnout laboratorní zdroj APT, spustit stejně nazvaný program na PC a nastavit nominální napájecí hodnoty. Programem APT povolte napájení SZ.
- 15) Vypnout pomocné lasery a osvětlení místnosti.

- 16) V programu GPM zaktivujte funkci odstartování měření po ustálení osvětlení SZ zaškrtnutím políčka umístěným v pravém horním rohu v záložce měření a spusťte měření.
- 17) Při měření dalšího SZ je nutné znovu zkontrolovat fotometrická vzdálenost od středu svícení SZ do středu fotodetektoru luxmetru (za pomoci laserů a metru).

5.2.3 Zpracování měření

Změřené a přepočítané hodnoty svítivosti z programu GPM byly uloženy v souboru excel. Nezměřené hodnoty pro $C 5^\circ$ a $\gamma 178^\circ$ byly dopočítány průměrováním hodnot vedlejších stupňů rovin C a úhlů γ (pro C roviny se průměrovaly hodnoty $0-10^\circ$ a pro γ úhly $176^\circ-0^\circ$).

Pro grafické zpracování bylo využito programu MatLab, kde byl vytvořen skript (Obr. 5.9).

```

1 - clc
2 - clear
3
4 - dataset = xlsread('Goniofotometer.xlsx', 'Zdroj 22', 'A1:BVI812');
5 - r = 0.661;
6 - fi = 745.7622;
7 - I = dataset(2:92,2:74);
8 - In = I.*(1000/fi);
9
10 - GAMA=(0:2:180);
11 - CROVINY=(0:5:360);
12
13 - [GAMAm,CROVINYm]=meshgrid(GAMA,CROVINY);
14
15 - y = sind(GAMAm).*sind(CROVINYm).*In';
16 - x = sind(GAMAm).*cosd(CROVINYm).*In';
17 - z = cosd(GAMAm).*(-In)';
18
19 - pomer=120;
20
21 - figure
22 - polar(0,150)
23
24 - hold on
25 - fig = surf(x,y,z,In')
26 - view([45 45 45]);
27 - alpha(0.65);
28 - daspect([1 1 1]);
29 - pbaspect([1 1 1]);
30 - colormap jet;
31 - colorbar;
32 - [cmin,cmax] = caxis;
33 - caxis([0,pomer]);
34 - set(gca,'Color','k');
35 - ax = gca;
36 - ax.GridColor = [1, 1, 1];
37 - ax.GridAlpha = 0.5;
38 - ax.FontSize = 12;
39 - cb = colorbar;
40 - set(cb,'Color','w');
41 - set(gcf,'Color','k');
42 - hold off

```

%cteni namerene matice z xlsx souboru
%fotometricka vzdálenost mezi luxmetrem a stredovym bodem SZ
%lumeny zmerene z koule
%namerena svítivost v candelach
%intenzita vztazena na 1000 lumenu
%gamma 0 az 180 stupnu (mereno po 2 stupnich)
%c 0 az 360 stupnu (mereno po 5ti stupnich)
%prevod na kartezske souradnice Y
%prevod na kartezske souradnice X
%prevod na kartezske souradnice Z

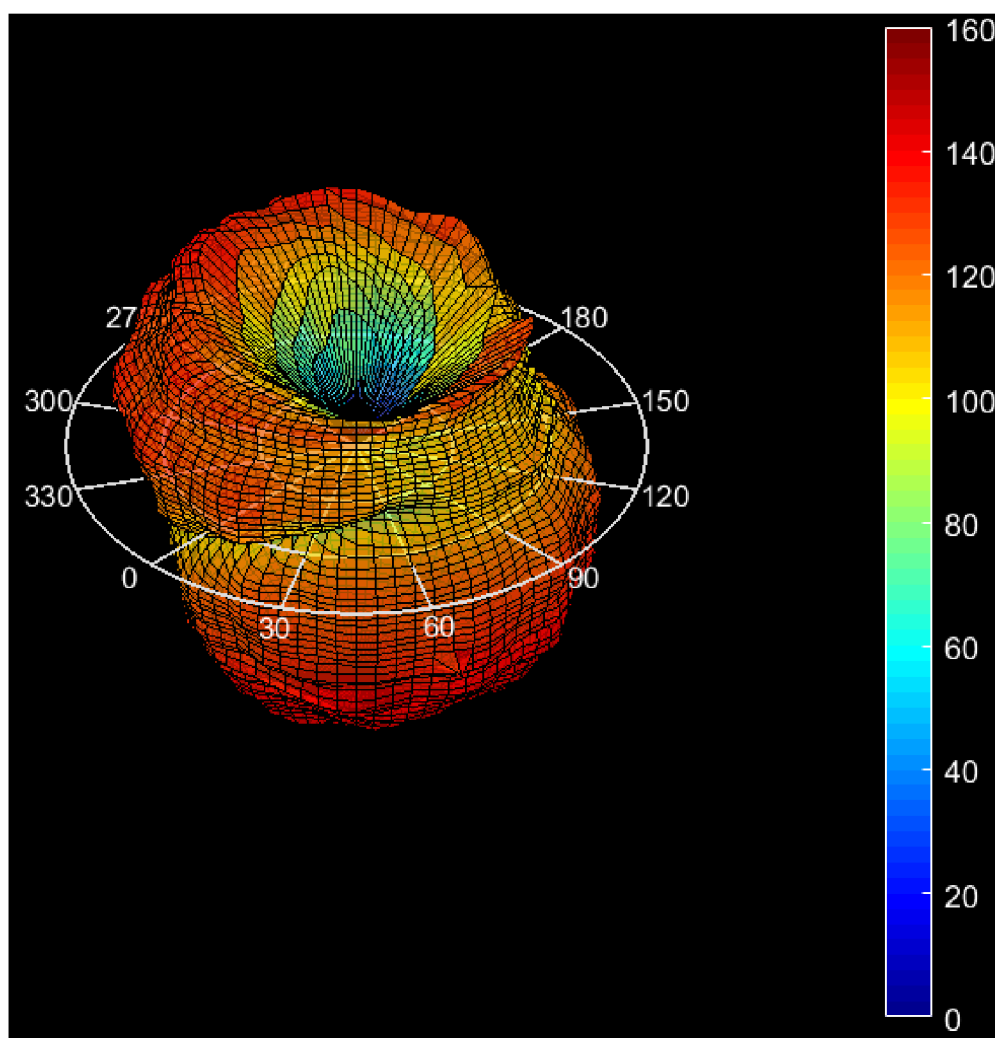
Obr. 5.9: MatLab skript pro zobrazení 3D svítivosti SZ, zdroj: autor

Skript čte data přímo z excelu příkazem ze čtvrtého řádku. Nahraje data do matice s názvem *dataset*. Do proměnné *r* byla nastavena hodnota fotometrické vzdálenosti v metrech a do proměnné *fi* hodnota světelného toku z měření v kulovém integrátoru daného SZ. Hodnoty svítivosti byly nastaveny do matice *I*(92x74), která je vztažena na poměr tisíce 1000 ku světelnému toku SZ. Tento

poměr je důležitý pro podobně velké zobrazení grafů svítivosti s různými intenzitami světelných toků (řádek 8). Výsledkem je přepočtená matice s hodnotami svítivosti $In(92 \times 74)$.

Na řádku 10 a 11 jsou nastaveny matice s měřeným rozsahem C- γ souřadnic, které jsou rozšířeny na rozměr 92×74 (řádek 13). Výsledné matice polárních souřadnic jsou následně přepočítány na kartézské souřadnice X, Y, Z (řádek 15-17).

Na řádku 19 je stanovena proměnná *pomer*, která udává maximální hodnotu barevné stupnice vykreslené v grafu funkcí *colorbar* (řádek 31). Hodnota této proměnné byla zadávána různě pro každý SZ dle hodnoty jeho světelného toku. V dalších řádcích skriptu jsou zadány funkce pro zobrazení 3D grafu svítivosti (Obr. 5.10).



Obr. 5.10: 3D graf svítivosti světelného zdroje č.1, zdroj: autor

Vztažená svítivost barevné stupnice je v jednotkách $cd \cdot klm^{-1}$. Polární rastr vytvořený kolem 3D zobrazení svítivosti odpovídá měřeným C souřadnicím daného SZ.

5.2.4 Seznam použitých přístrojů a zařízení

Tabulka 4: Seznam použitých přístrojů a zařízení

Název	Výrobce	Typ	Hlavní parametry a funkce	Evidenční číslo
Goniofotometr	-	(Prototyp)	Konstrukce s pevným SZ a pohyblivým fotodetektozem	-
Luxmetr	PRC Krochmann	RadioLux 111	Rozsah měřitelného osvětlení: 1 mlx–360 klx Třída přesnosti: L Funkce ukládání naměřených hodnot Funkce automatického přepínání rozsahu Kalibrováno: 5/2018	-
Tyč s přívodem napájení	-	(Prototyp)	Funkce pevného uchycení SZ a nastavení jeho fotometrické vzdálenosti vůči fotodetektoru Patice E27	-
Laboratorní zdroj APT	APT	300XAC	Střídavé napětí na výstupu: 5–300 V Maximální zdánlivý výkon: 1 kVA	-
PC	-	Stolní počítač	Funkce zprostředkování programu pro monitoring a zápis měření dat luxmetru a laboratorního zdroje APT	-

5.2.5 Laboratorní podmínky

Měření bylo časově náročné a probíhalo v několika dnech, ve kterých byly odlišné laboratorní podmínky.

Nicméně jejich hodnoty nepřesahovali hranice, které by byly v rozporu s rozsahem doporučených provozních podmínek pro výše uvedené přístroje. Teplota okolí se pohybovala při všech měřeních kolem $22 \pm 1^\circ\text{C}$. Relativní vlhkost se pohybovala od 31 do 35 % a tlak od 979 do 1045 hPa.

5.3 Měření křížových charakteristik

Teoretický úvod metodiky měření na kulovém integrátoru je popsán v kapitole 4.4.

V tomto měření je použito stejné značení měřených SZ jako při měření na kulovém integrátoru (Tabulka 1).

Hlavním parametrem v křížové charakteristice je měření celkového světelného toku Φ SZ při změně napájecího napětí. Metoda měření tohoto parametru a jeho problematika je stanovena měřením v kulovém integrátoru (kapitola 4.2 a 5.1), kde byla určena i celková hodnota měrného výkonu M_z . Nominální hodnoty ostatních parametrů jsou určeny v tomto měření.

Měření hodnot pro změnu světelného toku zde probíhá při nenominálních hodnotách napájecího napětí v uzavřeném prostoru malého kulového integrátoru, kde je umístěn i měřený SZ. Veškeré naměřené hodnoty budou procentuálně porovnávány s nominálními. Díky tomu můžeme měřit pouze intenzitu osvětlení fotodetektoru umístěném v malém kulovém integrátoru, který díky jeho převodu (460 lm/V) můžeme přepočíst na hodnotu světelného toku.

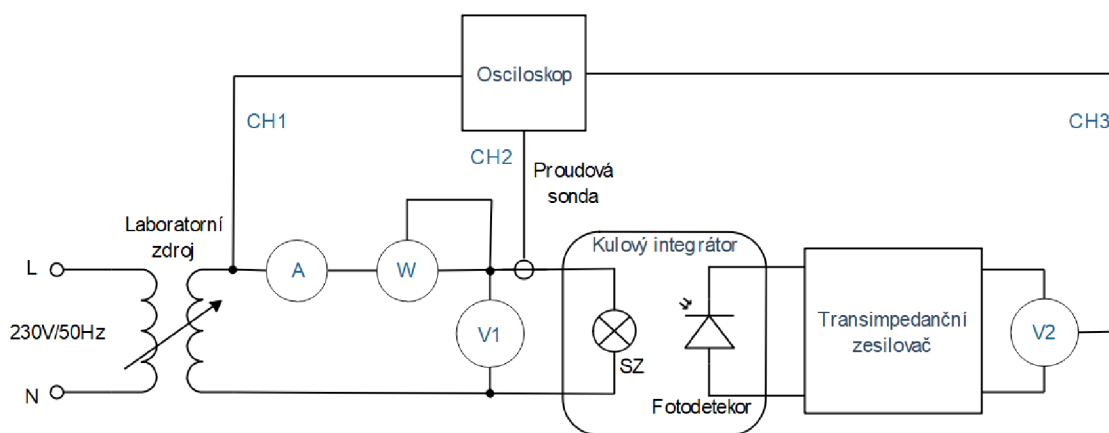
5.3.1 Schéma zapojení

Měřený **SZ** je umístěn v patici malého **kulového integrátoru**, který má napájecí svorky vyvedené mimo vnitřek koule (Obr. 5.11).

Na svorky je paralelně napojen jeden napětový vstup panelového přístroje SMP 44 s označením **V1** a sériově k tomu připojen proudový vstup ampérmetrem s označením **A**. Wattmetr s označením **W** ve schématu znázorňuje digitální nepřímé měření parametrů multifunkčním panelovým přístrojem a analyzátozem kvality energie SMP 44. Tento obvod je napájený **laboratorním zdrojem** DIAMETRAL, s regulovatelným napětím po kroku jednoho voltu v rozsahu 0-290 V.

Pro zobrazení průběhu odebíraného napětí, proudu a intenzity světelného toku je zde využito **osciloskopu TEKTRONIX TPS 2014**. Z proudové svorky na přístroji SMP 44 je připojen kabelem s BNC konektorem kanál s označením **CH1** do osciloskopu. Tento kanál přenáší obraz průběhu napájecího napětí SZ. Přes proudovou sondu je připojen do osciloskopu kanál s označením **CH2**, který přenáší průběh napájecího proudu SZ.

Uvnitř kulového integrátoru je také fotodetektor měřící intenzitu světelného toku. Pro zesílení signálu fotodetektoru je jeho výstup napojen na **transimpedanční zesilovač** s paralelním připojením multimetru UNI-T UT81A nastaveného na měření stejnosměrného napětí (označeno **V2** ve schématu). Z jeho napětového potenciálu je napojen kanál s označením **CH3** do osciloskopu, zobrazující průběh intenzity světelného toku v čase.



Obr. 5.11: Schéma zapojení pracoviště pro měření křížových charakteristik, zdroj: autor

5.3.2 Postup měření

- 1) Zapojit pracoviště dle schéma zapojení a zapnout všechny přístroje.
- 2) Nainstalovat měřený očištěný SZ do kulového integrátoru.
- 3) Nastavit nominální hodnotu napájecího napětí na laboratorním zdroji.
- 4) Povolit vstup nastaveného napětí na zdroji tlačítkem „out“ a počkat na zahoření SZ. (pozorujeme hodnotu napětí na V2 do jejího ustálení)

- 5) Nastavit na osciloskopu vhodné zobrazení všech připojených kanálů.
- 6) Po zahoření SZ a nastavení průběhů na osciloskopu zkontrolujte, zda jsou všechny hodnoty nominální a stiskněte tlačítko „print“ na osciloskopu.
- 7) Opište hodnoty z panelového přístroje SMP 44 (U , I , P , Q , S , $\cos\varphi$, PF) a hodnotu napětí z V2 (U_ϕ).
- 8) Zvýšit napětí laboratorního zdroje o 5 V, počkat na ustálení hodnot a poté je zapsat. (Zvyšování napětí opakujte po kroku 5 V až do 250 V)
- 9) Po změření hodnot pro $U=250$ V. Nastavte hodnotu napětí laboratorního zdroje na 225 V a postupně zapisujte hodnoty a snižujte napětí po 5 V do chvíle kdy nebude SZ distribuovat měřitelné hodnoty.

5.3.3 Zpracování měření

Nenominální hodnoty intenzity světelného toku U_ϕ jsou přepočítány na jednotky světelného toku vynásobením převodním činitelem malého kulového integrátoru (460 lm/V). Nominální hodnota světelného toku Φ , stejně tak jako hodnota měrného výkonu, byly vloženy z měření na kulovém integrátoru (Tabulka 2). Nenominální hodnoty měrného výkonu M_z byly vypočteny podílem světelného toku a činného výkonu při daném napětí dle vzorce (2.9).

U měření lineárních SZ byl naměřen jalový výkon způsobený přechodovým odporem u uchycení patice se SZ v kulovém integrátoru. Křížová charakteristika jalového výkonu nebude u lineárních SZ zobrazena v grafickém zpracování z důvodu chyby měření.

Hodnoty elektrické účinnosti η jsou vypočteny podílem čitatele obsahujícího součin proudu I s napětím U a jmenovatelem obsahujícího zdánlivý výkon S ,

$$\eta = \frac{U \cdot I}{S} \quad (-; V, A, VA) \quad (5.7)$$

kde η je bezrozměrná jednotka, vyjadřující poměr celkového příkonu vůči zdánlivému příkonu a tím zahrnuje ztráty v předřadných obvodech. Veškeré změřené hodnoty byly přepočteny na procentuální poměr jejich nominální hodnot. V grafickém zpracování jsou výsledné body křížové charakteristiky proloženy křivkami pro zobrazení teoreticky skutečného průběhu (Obr. 5.12).

Při měření se při kroku č.6 postupu měření ukládali nominální hodnoty průběhů všech kanálů na datovou kartu vloženou v osciloskopu. Změřené průběhy obsahovali značný šum, který byl odstraněn zprůměrováním hodnot v časových úsecích po 100 μ s, což zkreslilo výsledné zobrazení průběhu s minimálním šumem. Výsledný průběh odpovídá více reálnému průběhu a je lépe odečitatelný z grafu.

Hodnoty průběhu proudu a světelného toku jsou taktéž procentuálně přepočteny vůči nominálním hodnotám (Obr. 5.13).

Tabulka 5: Změřené a vypočtené hodnoty křížových charakteristik zdroje č.1

U_{NASTAV}	$U_{NASTAV\%}$	U	$U\%$	I	$I\%$	U_{Φ}	Φ	$\Phi\%$	$\cos\varphi$	$\cos\varphi\%$	PF	$PF\%$	P	$P\%$	Q	$Q\%$	S	$S\%$	M_Z	$M_{Z\%}$	η	$\eta\%$	Poznámka
[V]	[%]	[V]	[%]	[A]	[%]	[V]	[lm]	[%]	[-]	[%]	[-]	[%]	[W]	[%]	[VAR]	[%]	[VA]	[%]	[lm/W]	[%]	[-]	[%]	
250	108,7	249,1	108,3	0,268	104,3	1,781	819,3	139,9	1,00	100,0	1,00	100,0	66,74	111,85	1,71	111,9	66,81	113,0	12,28	125,13	1,00	99,93	
245	106,5	245,5	106,7	0,266	103,5	1,692	778,3	133,0	1,00	100,0	1,00	100,0	65,26	109,37	1,67	109,8	65,57	110,9	11,93	121,57	1,00	99,60	
240	104,3	239,0	103,9	0,263	102,3	1,546	711,2	121,5	1,00	100,0	1,00	100,0	62,58	104,88	1,60	104,8	62,87	106,3	11,36	115,84	1,00	99,99	
235	102,2	235,8	102,5	0,256	99,6	1,425	655,5	112,0	1,00	100,0	1,00	100,0	60,71	101,74	1,57	102,9	60,75	102,7	10,80	110,06	0,99	99,37	
230	100,0	230,1	100,0	0,257	100,0	1,340	585,3	100,0	1,00	100,0	1,00	100,0	59,67	100,00	1,53	100,0	59,14	100,0	9,81	100,00	1,00	100,00	
225	97,8	225,3	97,9	0,254	98,8	1,226	564,0	96,4	1,00	100,0	1,00	100,0	57,60	96,53	1,50	98,1	57,18	96,7	9,79	99,81	1,00	100,09	Př. výpočtu
220	95,7	219,8	95,5	0,251	97,7	1,145	526,7	90,0	1,00	100,0	1,00	100,0	55,39	92,83	1,47	96,3	55,13	93,2	9,51	96,93	1,00	100,08	
215	93,5	214,9	93,4	0,248	96,5	1,050	483,0	82,5	1,00	100,0	1,00	100,0	53,29	89,31	1,41	92,5	53,36	90,2	9,06	92,39	1,00	99,89	
210	91,3	209,5	91,0	0,245	95,3	0,951	437,5	74,7	1,00	100,0	1,00	100,0	51,43	86,19	1,39	90,8	51,21	86,6	8,51	86,71	1,00	100,24	
205	89,1	204,7	89,0	0,241	93,8	0,867	398,8	68,1	1,00	100,0	1,00	100,0	49,05	82,20	1,30	85,5	49,21	83,2	8,13	82,88	1,00	100,26	
200	87,0	199,5	86,7	0,238	92,6	0,796	366,2	62,6	1,00	100,0	1,00	100,0	47,66	79,87	1,28	83,9	47,62	80,5	7,68	78,32	1,00	99,72	
195	84,8	194,5	84,5	0,235	91,4	0,723	332,6	56,8	1,00	100,0	1,00	100,0	45,57	76,37	1,23	80,7	45,60	77,1	7,30	74,40	1,00	100,24	
190	82,6	189,1	82,2	0,232	90,3	0,654	300,8	51,4	1,00	100,0	1,00	100,0	43,87	73,52	1,17	76,7	43,79	74,0	6,86	69,90	1,00	100,19	
185	80,4	184,2	80,1	0,228	88,7	0,588	270,5	46,2	1,00	100,0	1,00	100,0	42,04	70,45	1,16	76,1	42,01	71,0	6,43	65,58	1,00	99,98	
180	78,3	179,8	78,1	0,225	87,5	0,538	247,5	42,3	1,00	100,0	1,00	100,0	40,51	67,89	1,11	73,0	40,54	68,5	6,11	62,27	1,00	99,80	
175	76,1	174,4	75,8	0,222	86,4	0,472	217,1	37,1	1,00	100,0	1,00	100,0	38,68	64,82	1,05	68,9	38,70	65,4	5,61	57,22	1,00	100,05	
170	73,9	169,2	73,5	0,219	85,2	0,415	190,9	32,6	1,00	100,0	1,00	100,0	36,90	61,84	1,02	66,6	36,82	62,3	5,17	52,74	1,01	100,65	
165	71,7	165,0	71,7	0,215	83,7	0,378	173,9	29,7	1,00	100,0	1,00	100,0	35,48	59,46	0,98	64,5	35,62	60,2	4,90	49,96	1,00	99,60	
160	69,6	159,6	69,4	0,212	82,5	0,328	150,9	25,8	1,00	100,0	1,00	100,0	33,80	56,64	0,95	62,5	33,80	57,2	4,46	45,50	1,00	100,11	
155	67,4	155,2	67,4	0,208	80,9	0,295	135,7	23,2	1,00	100,0	1,00	100,0	32,41	54,32	0,91	59,9	32,18	54,4	4,19	42,68	1,00	100,32	
150	65,2	150,1	65,2	0,204	79,4	0,254	116,8	20,0	1,00	100,0	1,00	100,0	30,65	51,37	0,86	56,5	30,78	52,0	3,81	38,86	0,99	99,49	
145	63,0	144,2	62,7	0,201	78,2	0,217	99,8	17,1	1,00	100,0	1,00	100,0	29,13	48,82	0,83	54,2	29,18	49,3	3,43	34,93	0,99	99,34	
140	60,9	139,5	60,6	0,197	76,7	0,185	85,1	14,5	1,00	100,0	1,00	100,0	27,10	45,42	0,79	51,8	27,36	46,3	3,14	32,01	1,00	100,45	
135	58,7	134,4	58,4	0,193	75,1	0,159	73,1	12,5	1,00	100,0	1,00	100,0	26,04	43,64	0,76	49,8	26,00	44,0	2,81	28,63	1,00	99,77	
130	56,5	129,3	56,2	0,189	73,5	0,133	61,2	10,5	1,00	100,0	1,00	100,0	24,43	40,94	0,71	46,4	24,50	41,4	2,50	25,53	1,00	99,75	
125	54,3	123,9	53,8	0,185	72,0	0,109	50,1	8,6	1,00	100,0	1,00	100,0	22,88	38,34	0,66	43,5	22,84	38,6	2,19	22,34	1,00	100,36	
120	52,2	119,7	52,0	0,181	70,4	0,093	42,8	7,3	1,00	100,0	1,00	100,0	21,76	36,47	0,64	41,8	21,82	36,9	1,97	20,04	0,99	99,30	
115	50,0	114,7	49,8	0,178	69,3	0,076	35,0	6,0	1,00	100,0	1,00	100,0	20,39	34,17	0,60	39,6	20,44	34,6	1,71	17,48	1,00	99,89	
110	47,8	109,7	47,7	0,174	67,7	0,061	28,1	4,8	1,00	100,0	1,00	100,0	19,05	31,93	0,56	36,7	19,02	32,2	1,47	15,01	1,00	100,36	
105	45,7	103,9	45,2	0,169	65,8	0,046	21,2	3,6	1,00	100,0	1,00	100,0	17,65	29,58	0,54	35,1	17,64	29,8	1,20	12,22	1,00	99,55	
100	43,5	99,7	43,3	0,166	64,6	0,038	17,5	3,0	1,00	100,0	1,00	100,0	16,52	27,69	0,49	32,4	16,53	28,0	1,06	10,79	1,00	100,13	
95	41,3	94,5	41,1	0,161	62,6	0,029	13,3	2,3	1,00	100,0	1,00	100,0	15,18	25,44	0,47	30,8	15,22	25,7	0,88	8,96	1,00	99,97	
90	39,1	89,2	38,8	0,156	60,7	0,021	9,7	1,7	1,00	100,0	1,00	100,0	13,95	23,38	0,43	28,2	13,98	23,6	0,69	7,06	1,00	99,54	
85	37,0	83,8	36,4	0,151	58,8	0,015	6,9	1,2	1,00	100,0	1,00	100,0	12,70	21,28	0,40	26,2	12,72	21,5	0,54	5,54	0,99	99,49	
80	34,8	79,7	34,6	0,147	57,2	0,011	5,1	0,9	1,00	100,0	1,00	100,0	11,72	19,64	0,36	23,4	11,75	19,9	0,43	4,40	1,00	99,72	
75	32,6	74,2	32,2	0,142	55,3	0,008	3,7	0,6	1,00	100,0	1,00	100,0	10,55	17,68	0,32	21,2	10,58	17,9	0,35	3,56	1,00	99,60	

5.3.3.1 Příklad výpočtu tabulky 5, řádek 8:

- a) Výpočet procentuálního poměru nastaveného napětí:

$$U_{NASTAV\%} = \frac{U_{NASTAV}}{U_{NASTAVN}} \cdot 100 = \frac{225}{230} \cdot 100 = 97,83 \%$$

- b) Výpočet procentuálního poměru reálného napětí:

$$U_{\%} = \frac{U}{U_N} \cdot 100 = \frac{225,3}{230} \cdot 100 = 97,91 \%$$

- c) Výpočet procentuálního poměru odebíraného proudu:

$$I_{\%} = \frac{I}{I_N} \cdot 100 = \frac{0,254}{0,257} \cdot 100 = 98,83 \%$$

- d) Výpočet světelného toku ze změřené intenzity
- U_{ϕ}
- :

$$\Phi = U_{\phi} \cdot 460 = 1,226 \cdot 460 = 564,0 \text{ lm}$$

- e) Výpočet procentuálního poměru světelného toku:

$$\Phi_{\%} = \frac{\Phi}{\Phi_N} \cdot 100 = \frac{564,0}{585,3} \cdot 100 = 96,35 \%$$

- f) Výpočet procentuálního poměru účinníku:

$$\cos\varphi_{\%} = \frac{\cos\varphi}{\cos\varphi_N} \cdot 100 = \frac{1,00}{1,00} \cdot 100 = 100,00 \%$$

- g) Výpočet procentuálního poměru skutečného účinníku:

$$PF_{\%} = \frac{PF}{PF_N} \cdot 100 = \frac{1,00}{1,00} \cdot 100 = 100,00 \%$$

- h) Výpočet procentuálního poměru činného výkonu:

$$P_{\%} = \frac{P}{P_N} \cdot 100 = \frac{57,60}{59,67} \cdot 100 = 96,53 \%$$

- i) Výpočet procentuálního poměru jalového výkonu:

$$Q_{\%} = \frac{Q}{Q_N} \cdot 100 = \frac{1,50}{1,53} \cdot 100 = 98,10 \%$$

- j) Výpočet procentuálního poměru zdánlivého výkonu:

$$S_{\%} = \frac{S}{S_N} \cdot 100 = \frac{57,18}{59,14} \cdot 100 = 96,69 \%$$

- k) Výpočet měrného výkonu:

$$M_Z = \frac{\Phi}{P} = \frac{9,80}{57,60} = 9,79 \text{ lm/W}$$

- l) Výpočet procentuálního poměru měrného výkonu

$$M_{Z\%} = \frac{M_Z}{M_{ZN}} \cdot 100 = \frac{9,79}{9,81} \cdot 100 = 99,81 \%$$

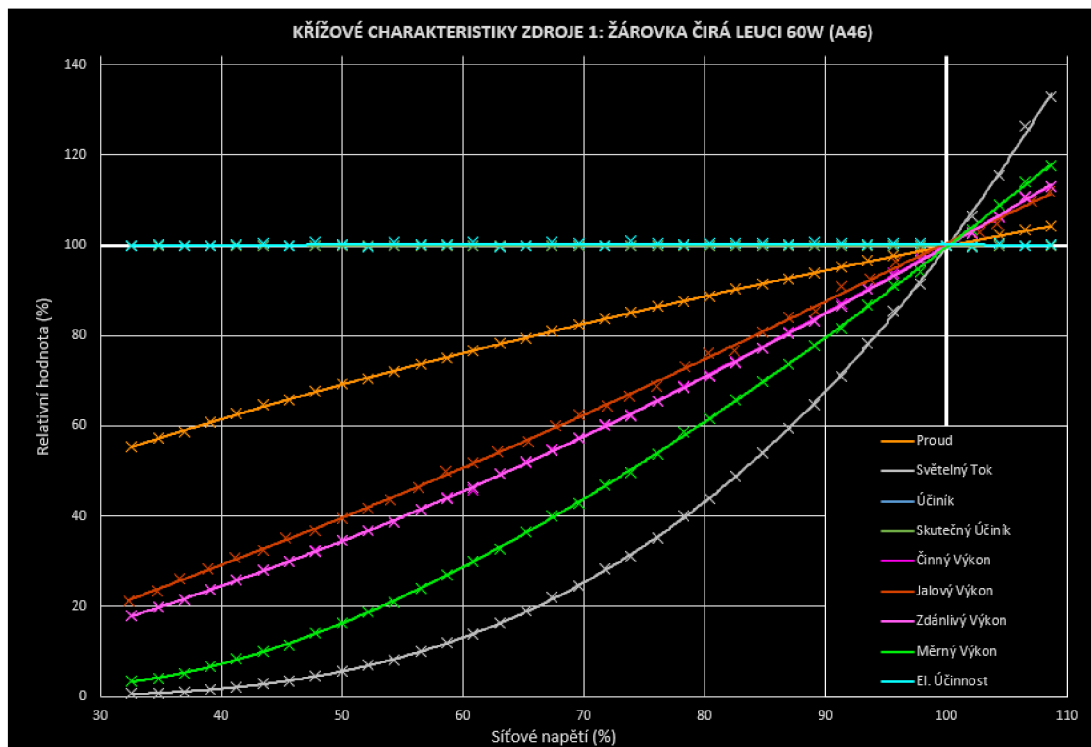
- m) Výpočet elektrické účinnosti:

$$\eta = \frac{U \cdot I}{S} = \frac{230,1 \cdot 0,257}{57,18} = 1,00$$

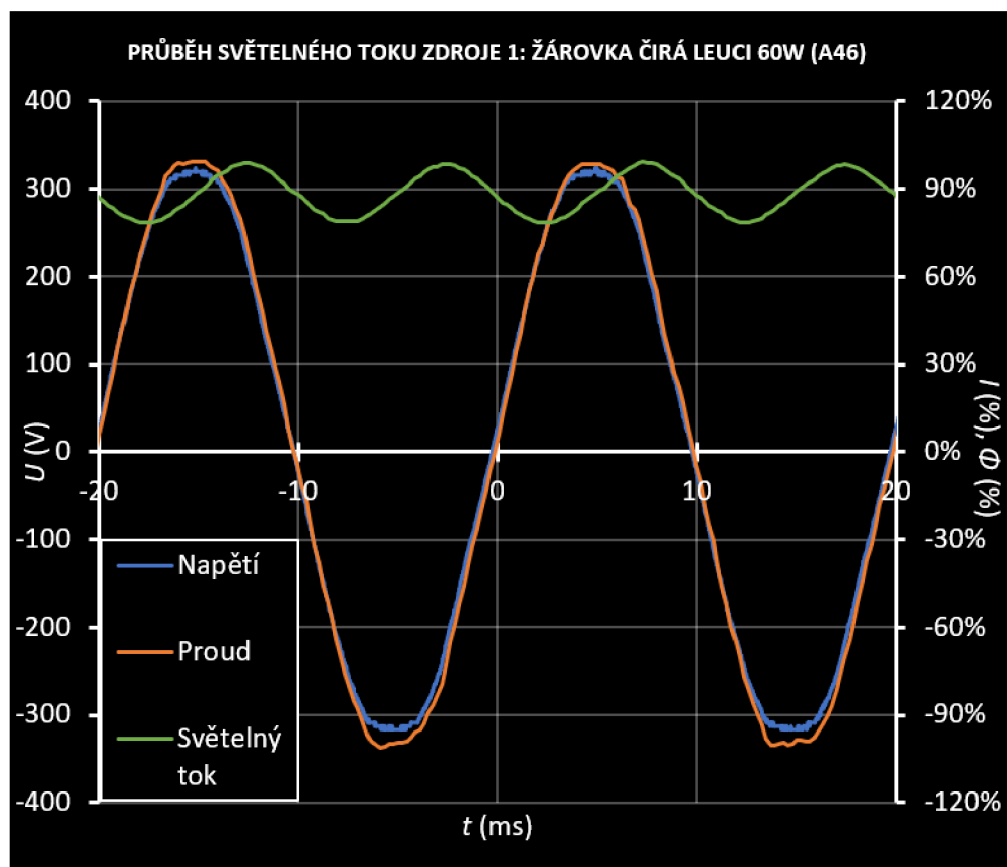
- n) Výpočet procentuálního poměru elektrické účinnosti:

$$\eta_{\%} = \frac{\eta}{\eta_N} \cdot 100 = \frac{1,00}{1,00} \cdot 100 = 100,00 \%$$

5.3.3.2 Grafické zpracování



Obr. 5.12: Křížové charakteristiky zdroje č.1, zdroj: autor



Obr. 5.13: Průběh světelného toku zdroje č.1, zdroj: autor

5.3.4 Seznam použitých přístrojů a zařízení

Tabulka 6: Seznam použitých přístrojů a zařízení

Název	Výrobce	Typ	Hlavní parametry a funkce	Evidenční číslo
Malý kulový integrátor	-	-	Převod integrátoru: 460 lm/V Fotodetektor	-
Laboratorní zdroj	DIAMETRAL	AC250K2D	Napájecí napětí: 230 V/ 50 Hz Výstupní frekvence: 50Hz sinus Výstupní proud: 2 A Stabilita výstupního napětí: 1-9 V dle momentální konfigurace Rozsah: 0-290 V Přesnost měřicího přístroje: 2,5 % z rozsahu	-
Multimetr	UNI-T	UT81A	Rozsah měřitelného DC napětí: 0-1000 V Rozsah měřitelného AC napětí: 0-750 V Přesnost měření DC napětí: 0,8 % Přesnost měření AC napětí: 1 % Rozsah měřitelného DC proudu: 0-10 A Rozsah měřitelného AC proudu: 0-10 A	-
Proudová sonda	CHAUVIN ARNOUX	E3N	Max. průměr měřeného vodiče: 11,8 mm Rozsah měření proudu DC: 0,1-10/100 A Rozsah měření proudu AC: 0,1-10/100 A Přesnost měření proudu DC: $\pm (3 \% + 50 \text{ mA})$ Přesnost měření proudu AC: $\pm (3 \% + 50 \text{ mA})$ Výstupní signál pro 10 A: 100 mV/1 A Výstupní signál pro 100 A: 10 mV/1 A	10001783 44
Multifunkční panelový přístroj a analyzátor kvality energie	KMB SYSTEMS	SMP 44	LCD grafický displej Počet napěťových vstupů: 4 Počet proudových vstupů: 4 Rozsah napájecího napětí AC: 85-275 V Rozsah napájecího napětí DC: 20-75 V Rozsah měřicího napětí 400: 200-400 V (L-N) Rozsah měřicího napětí 100: 57,7-130 V (L-N)	-
Osciloskop	TEKTRONIX	TPS 2014	4-kanálový digitální osciloskop Šířka pásma: 100 MHz Vzorkovací frekvence: 1 GS/s Vertikální rozlišení: 8 bitů Vertikální senzitivita: 0,002-5 V/div DC vertikální přesnost: $\pm 3 \%$ Vstupní impedance: $1 \text{ M}\Omega \pm 2 \%$ (20 pF) Rozsah časové základny: 5ns - 5s/div Přesnost časové základny: 500 ppm	-

5.3.5 Laboratorní podmínky

Měření bylo časově náročné a probíhalo v několika dnech, ve kterých byly odlišné laboratorní podmínky.

Nicméně jejich hodnoty nepřesahovali hranice, které by byly v rozporu s rozsahem doporučených provozních podmínek pro výše uvedené přístroje. Teplota okolí se pohybovala při všech měřeních kolem $22 \pm 0,5^\circ\text{C}$. Relativní vlhkost se pohybovala od 28 do 33 % a tlak od 1012 do 1080 hPa.

5.4 Návrh a zpracování karet s naměřenými parametry

Pro každý změřený světelný zdroj je vytvořena karta, která obsahuje data dosažené z výše uvedených měření. Karta bude provedena v černé barvě společně s pozadím grafů, tak aby vyhovovala laboratorním podmínkám a neodrážela nepotřebné záření.

Grafika karty bude vytvořena v programu pro editaci vektorové grafiky Inkscape. Hotová grafika bude vytisknuta o rozměru 150x150mm a následně zalaminátována. Tyto rozměry a rozložení dat na kartě plně zaplní prostor pod SZ v interaktivním panelu.

5.4.1 Inkscape

Je profesionální editor vektorové grafiky, využívající grafického formátu SVG (anglicky *Scalable Vector Graphics*) tzv. škálovatelnou vektorovou grafiku. [26]

Vektorová grafika je jeden ze dvou základních způsobů představování obrazových informací v počítačové grafice. Druhým způsobem je rastrová grafika, u kterého je celé zobrazení popsáno pomocí hodnot jednotlivých pixelů uspořádaných do pravoúhlé mřížky, zatímco vektorový obrázek je tvořen přesně definovanými útvary jako jsou například body, přímky, křivky a mnohoúhelníky. [27]

SVG popisuje tuto dvourozměrnou vektorovou grafiku pomocí značkovacího jazyku XML (anglicky *eXtensible Markup Language*), který je podporováno řadou nástrojů a programovacích jazyků. [28]

Tento editor jsem vybral hlavně z hlediska toho, že je to tzv. otevřený software, který je zdarma ke stažení na rozdíl od konkurenčních grafických editorů (např.: Photoshop, Corel Draw nebo Illustrator) [29] a nějak zvláště nezaostává svými funkcemi.

5.4.2 Popis rozložení karty

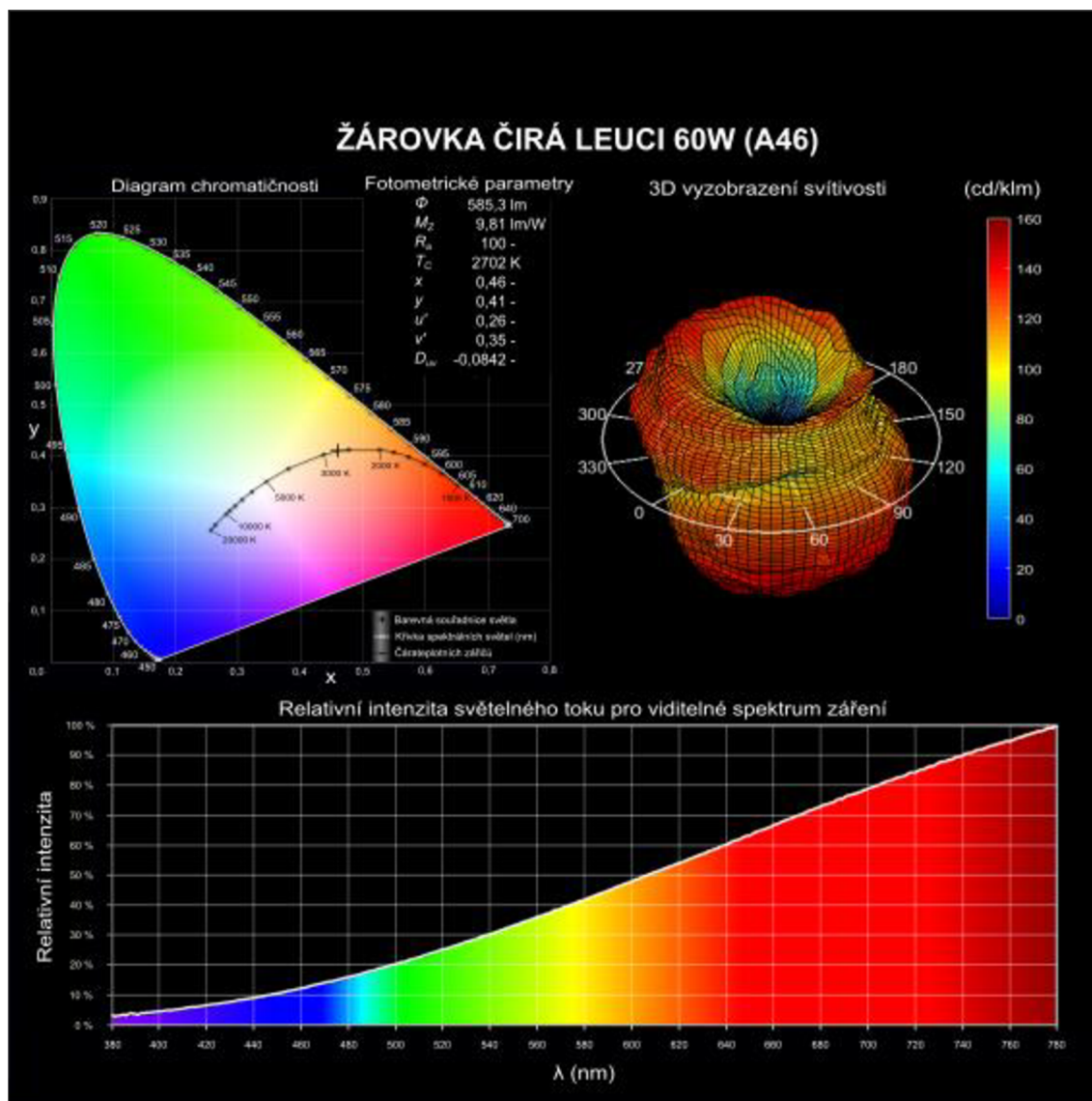
Přehled grafiky a rozmístění informací světelných zdrojů na oboustranné kartě je znázorněn na Obr. 5.14 pro přední stranu a na Obr. 5.15 pro zadní stranu.

Na přední straně jsou zobrazeny fotometrické parametry zdroje spolu s diagramem chromatičnosti, světelným spektrem a vztaženou svítivostí ve 3D světelného zdroje.

Fotometrické parametry jsou pro využití prostoru umístěny do pravého horního rohu diagramu chromatičnosti, kde nezasahuje trichromatický trojúhelník CIE 1931. V přehledu fotometrických parametrů je zobrazena hodnota světelného toku a měrného výkonu měřeného při nominálním stabilizovaném napětí, index podání barev, teplota chromatičnosti a trichromatické souřadnice SZ.

V pravé horní části přední strany karty je umístěn 3D graf svítivosti se vztaženými hodnotami svítivosti. V dolní části přední strany je umístěno vyzařované

spektrum zdroje s barevným pozadím odpovídajícím vlnovým délkám viditelného spektra. Nadpis a obsah kartičky je o kus posunutý směrem dolů, kvůli uchycení karty v panelu.

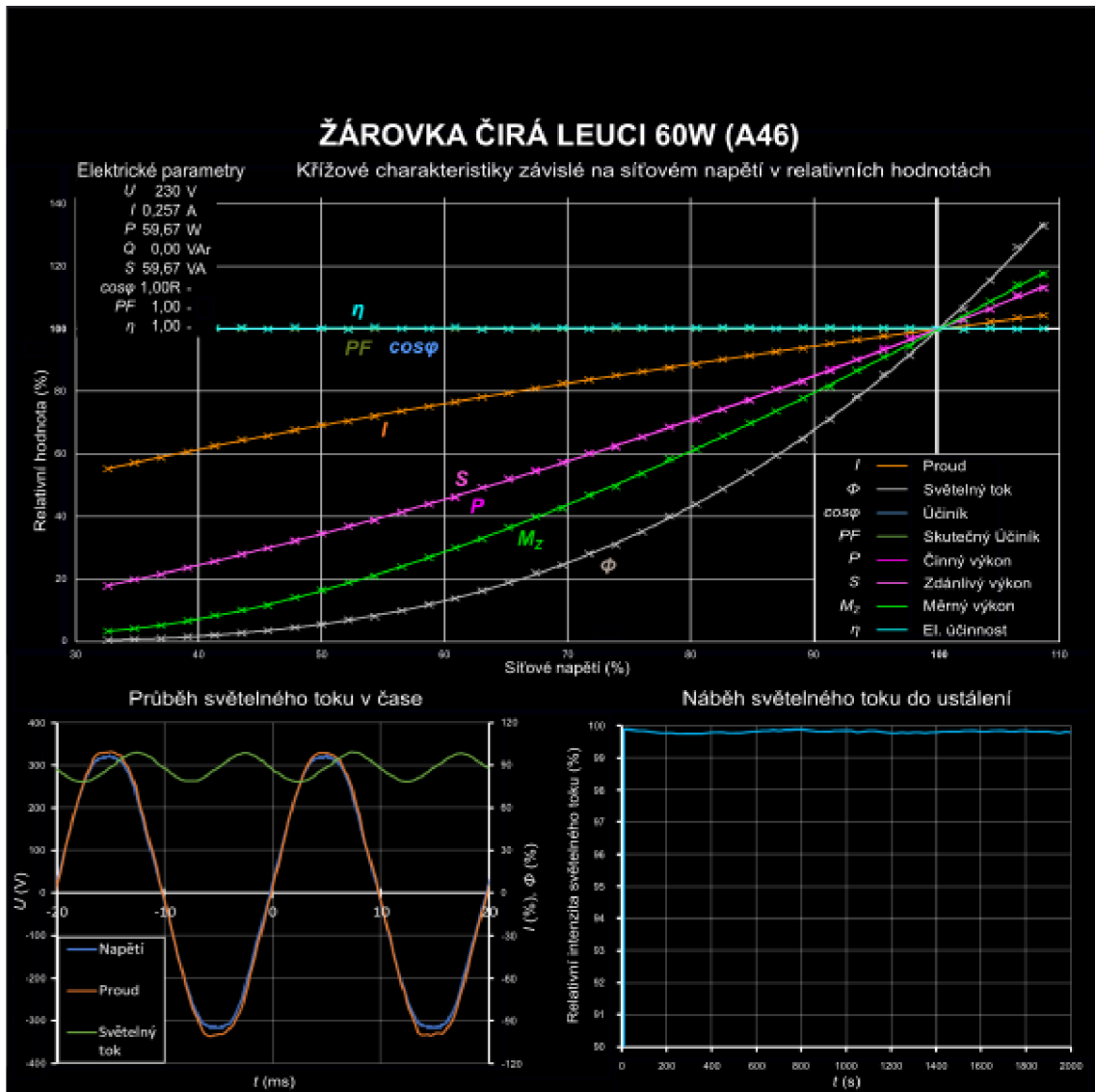


Obr. 5.14: Grafický návrh přední strany karty měřeného zdroje č. 1, zdroj: autor

Na zadní straně jsou zobrazeny elektrické parametry zdroje vložené do křížových charakteristik z důvodu využití místa na kartě. Křížové charakteristiky jsou umístěny na horní polovině zadní strany karty.

Uvedené elektrické parametry (napětí, odebraný proud, činný příkon, jalový příkon, zdánlivý příkon, účinník, skutečný účinník a elektrická účinnost) jsou nominální pro křížové hodnoty charakteristiky. Ostatní změřené nominální hodnoty pro křížovou charakteristiku (světelný tok a měrný výkon) se nachází na přední straně.

V levém dolním rohu strany je vložen průběh světelného toku, napětí a proudu v závislosti na čase. V pravém dolním rohu je zobrazen náběh světelného toku SZ. Zde je také nadpis a obsah kartičky o kus posunutý, kvůli uchycení karty v panelu.



Obr. 5.15: Grafický návrh zadní strany karty měřeného zdroje č. 1, zdroj: autor

6 Závěr

Úkolem práce bylo změřit fotometrické a elektrické parametry SZ pro interaktivní panel a následně zpracovat naměřená data. Dále bylo cílem navrhnout vzhled a uspořádání karet, popisující jednotlivé světelné zdroje.

V práci jsou popsány nezbytné teoretické i praktické informace o fotometrii, vybraných el. parametrech, měřených SZ, zařízeních, přístrojů a metodikách měření, které byly při zpracování měření využity.

V praktické části je vylíčen postup všech měření společně s popisem funkcí jednotlivých přístrojů a zařízení, které byly použity.

V měření na kulovém integrátoru je popsáno zapojení měřící soustavy, náběh světelného toku do doby zahoření zdroje a funkce korekce a její vliv na měření. Ve zpracování měření je popsán jeho postup a zpracování dat společně s tabulkou naměřených a vypočtených hodnot a příkladem výpočtu. V této části je také uveden soupis měřených světelných zdrojů, který platí pro všechna proběhlá měření (Tabulka 1).

Měření na goniofotometru je vylíčeno blokovým schématem a postupem měření čar svítivosti. Zpracování naměřených dat a výsledné 3D grafy svítivosti byly provedeny programem MatLab, kde byl zpracován skript podrobně posán v podkapitole 5.2.3.

V kapitole 5.3 Měření křížových charakteristik je popsán způsob zapojení, postup a zpracování měření.

Veškeré proběhlé měření bylo časově a datově náročné za účelem přesného laboratorního měření.

6.1 Přínos práce

Přínosem práce je 22 oboustranných karet z nichž jsou 4 karty nekompletní z důvodu špatně změřených dat, poškozených dat nebo absencí SZ při dalších měření. Dalším přínosem je vypracovaný postup a zpracování dat fotometrických měření jenž umožňuje opětovné nebo nové zpracování SZ měřených v laboratoři světelné techniky.

Výsledný návrh karet zprostředkovaný přes vektorovou grafiku obsahuje maximální množství informací zjištěný z měření SZ umístěných na omezenou velikost karty. Zhotovené karty se vloží do interaktivního panelu v laboratoři světelné techniky k měřeným SZ a budou sloužit jako učební pomůcka při laboratorních měření.

Citovaná literatura

- [1] Fotometrie. *WikiSkripta* [online]. CC, b.r. [cit. 2017-11-29]. Dostupné z: <http://www.wikiskripta.eu/w/Fotometrie>
- [2] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [3] Fotometrické veličiny. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. CC, b.r. [cit. 2017-11-30]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Fotometrick%C3%A9_veli%C4%8Diny
- [4] SOKANSKÝ, Karel. *Světelná technika*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN isbn978-80-01-04941-9.
- [5] BAXANT, Petr. *Světelná Technika* [online]. Brno: FEKT Vysoké učení technické v Brně, b.r. [cit. 2017-11-15]. Dostupné z: http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/images/stories/OPVK_ePower/
- [6] HABEL, Jiří. *Světlo - časopis pro světelnou techniku a osvětlování: Základy světelné techniky (3) - Světelnětechnické veličiny (1. část)* [online]. Praha: FCC Public, 2009 [cit. 2017-11-15]. ISSN 1212-0812. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/obsah-cisla-01-2009--348>
- [7] HABEL, Jiří. *Světlo - časopis pro světelnou techniku a osvětlování: Základy světelné techniky (5) - Základy nauky o barvě (1. část)* [online]. Praha: FCC Public, 2009 [cit. 2017-11-15]. ISSN 1212-0812. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/obsah-cisla-05-2009--352>
- [8] YOSHI, Ohno. Calculation of CCT and Duv and Practical Conversion Formulae. *Council For Optical Radiation Measurements* [online]. USA: CORM, 2011 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: http://cormusa.org/wp-content/uploads/2018/04/CORM_2011_Calculation_of_CCT_and_Duv_and_Practical_Conversion_Formulae.pdf
- [9] ŠKODA, Jan. *Světlo - časopis pro světelnou techniku a osvětlování: Jak vybrat správný světelný zdroj do domácnosti? (část 1)* [online]. Praha: FCC Public, 2015 [cit. 2017-11-15]. ISSN 1212-0812. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Svetlo/2015/02/Svetlo_02_2015/index.html#p=1
- [10] DRÁPELA, Jiří. *Kvalita elektrické energie a EMC Harmonické* [online]. Brno: VUT FEKT, 2013 [cit. 2019-05-12]. ISBN -. ISSN -. Dostupné z: http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/images/stories/OPVK_ePower/MPQ1/Ucebni_text_MPQ1.pdf

- [11] DVOŘÁČEK, Vladimír. *Světlo - časopis pro světelnou techniku a osvětlování: Obyčejné žárovky* [online]. Praha: FCC Public, 2008 [cit. 2017-11-15]. ISSN 1212-0812. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/obsah-cisla-04-2008--357>
- [12] DRÁPELA, Jiří. *Užití elektrické energie: Světelné zdroje a osvětlování* [online]. Brno: FEKT Vysokého učení technického v Brně, 2013 [cit. 2017-11-15]. Dostupné z: http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/images/stories/OPVK_ePower/
- [13] DVOŘÁČEK, Vladimír. *Světlo - časopis pro světelnou techniku a osvětlování: Halogenové žárovky* [online]. Praha: FCC Public, 2008 [cit. 2017-11-15]. ISSN 1212-0812. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/obsah-cisla-05-2008--358>
- [14] DVOŘÁČEK, Vladimír. *Světlo - časopis pro světelnou techniku a osvětlování: Lineární zářivky* [online]. Praha: FCC Public, 2008 [cit. 2017-11-15]. ISSN 1212-0812. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/obsah-cisla-02-2008--355>
- [15] BAXANT, Petr a Jiří DRÁPELA. *Světelná technika: Laboratorní cvičení* [online]. Brno: FEKT Vysoké učení technické v Brně, b.r. [cit. 2017-11-15]. Dostupné z: http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/images/stories/OPVK_ePower/
- [16] DVOŘÁČEK, Vladimír. *Světlo - časopis pro světelnou techniku a osvětlování: Kompaktní zářivky* [online]. Praha: FCC Public, 2008 [cit. 2017-11-15]. ISSN 1212-0812. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/obsah-cisla-03-2008--356>
- [17] DVOŘÁČEK, Vladimír. *Světlo - časopis pro světelnou techniku a osvětlování: Světelné diody* [online]. Praha: FCC Public, 2009 [cit. 2017-11-15]. ISSN 1212-0812. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/obsah-cisla-05-2009--352>
- [18] URBAN, František. *Optoelektronika: Skripta do Optoelektroniky pro Ústav Mikroelektroniky* [online]. Brno: VUT FEKT, 2002 [cit. 2019-05-11]. ISBN -. ISSN -. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/oks/cz/pdf/skripta.pdf>
- [19] HABEL, Jiří. *Světlo - časopis pro světelnou techniku a osvětlování: Základy světelné techniky (4) - Základy fotometrie (1. část)* [online]. Praha: FCC Public, 2009 [cit. 2017-11-15]. ISSN 1212-0812. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/obsah-cisla-03-2009--349>
- [20] Spectroradiometer spechos 1211UV. *Colorpro Group Ltd.* [online]. Taipei, Taiwan: Colorpro Group Ltd., 2016 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://www.shinolorpro.com/EN/products-details/no/1502421155001>

- [21] HABEL, Jiří. *Světlo - časopis pro světelnou techniku a osvětlování: Základy světelné techniky (4) - Základy fotometrie (2. část)* [online]. Praha: FCC Public, 2009 [cit. 2017-11-15]. ISSN 1212-0812. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/obsah-cisla-04-2009--351>
- [22] SOKANSKÝ, Karel. *Základy světelné techniky* [online]. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, FEL, 2007 [cit. 2019-05-11]. ISBN -. ISSN -. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/vuee/VUEE_Zaklady_svetelne_techniky.pdf
- [23] EDVARD, Csanyi. Electrical-engineering-portal: Luminous Measurement Graphic Representation. *Electrical Engineering Portal* [online]. -: -, 2012 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://electrical-engineering-portal.com/luminous-measurement-graphic-representation>
- [24] HERNÁNDEZ-ANDRÉS, Javier, RL LEE a J ROMERO. Calculating Correlated Color Temperatures Across the Entire Gamut of Daylight and Skylight Chromaticities. *United States Naval Academy* [online]. USA: USNA, 1999 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: https://www.usna.edu/Users/oceano/raylee/papers/RLee_AO_CCTpaper.pdf
- [25] Lighting Laboratory of the Helsinki University of Technology. *Lighting Laboratory of the Helsinki University of Technology* [online]. Helsinki: Lighting Laboratory of the HUT, 2007 [cit. 2017-12-06]. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20071109105911/http://www.lightinglab.fi/teaching/217/CRI_calculation.xls
- [26] Inkscape: Draw freely. *Inkscape: Draw freely* [online]. USA: GPL, 2003 [cit. 2017-11-29]. Dostupné z: <https://inkscape.org/cs/>
- [27] Vektorová grafika. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. CC, 2017 [cit. 2017-11-29]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Vektorov%C3%A1_grafika
- [28] Scalable Vector Graphics. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. CC, 2017 [cit. 2017-11-29]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Scalable_Vector_Graphics
- [29] ŠIMČÍK, Petr. *Inkscape: praktický průvodce tvorbou vektorové grafiky*. 1. vyd. Brno: Computer Press, 2013. ISBN 978-80-251-3813-7.

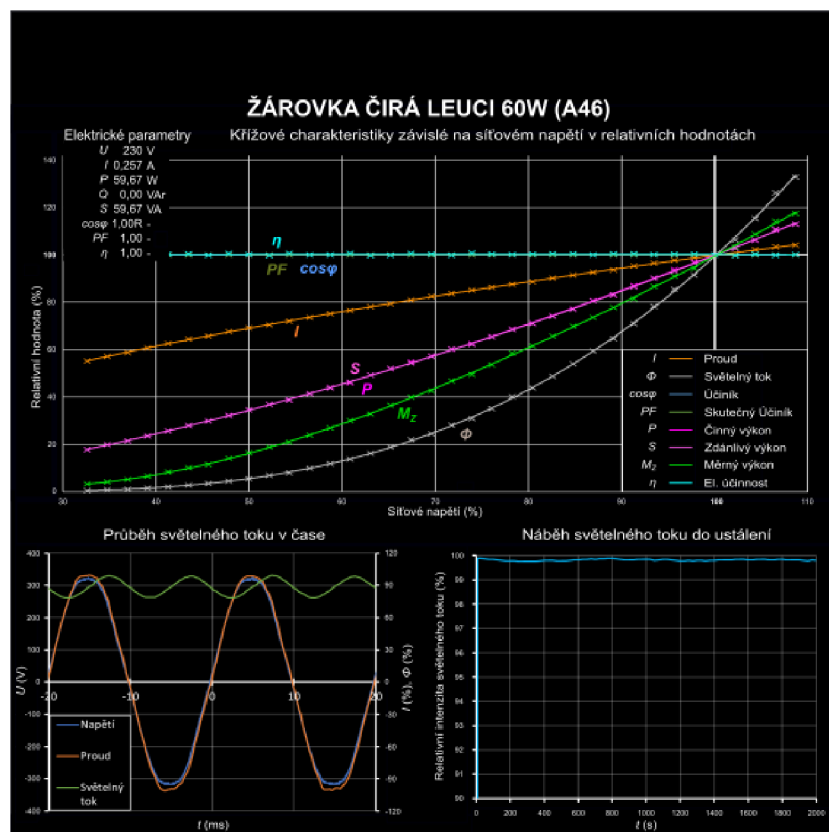
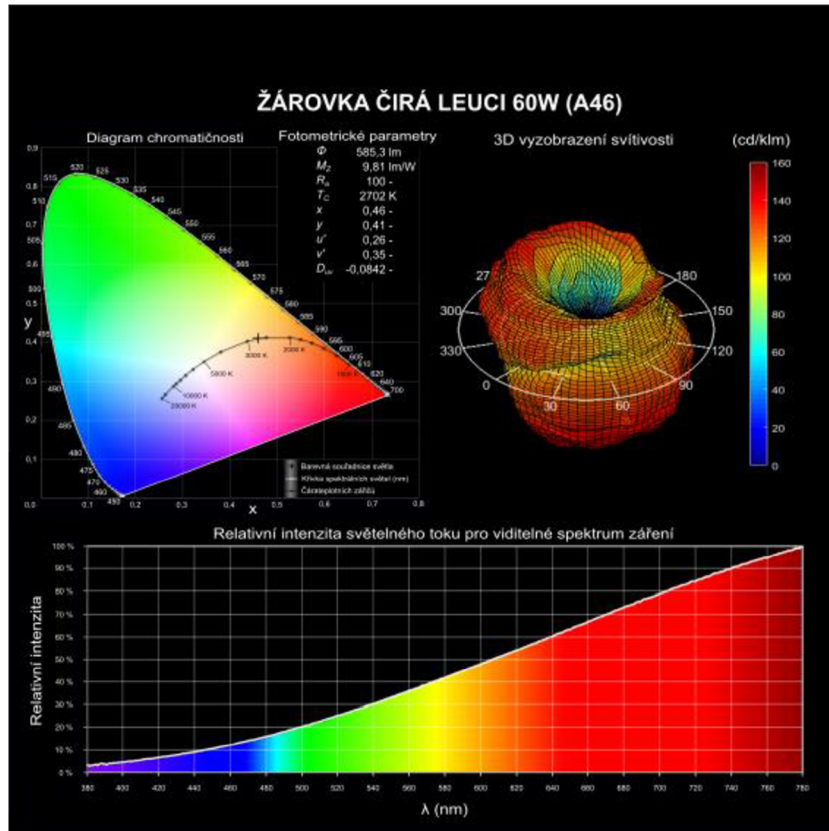
Seznam příloh

V této příloze jsou zobrazeny pouze výsledné návrhy karet (A), ostatní body seznamu přílohy jsou uvedeny v příloženém souboru.

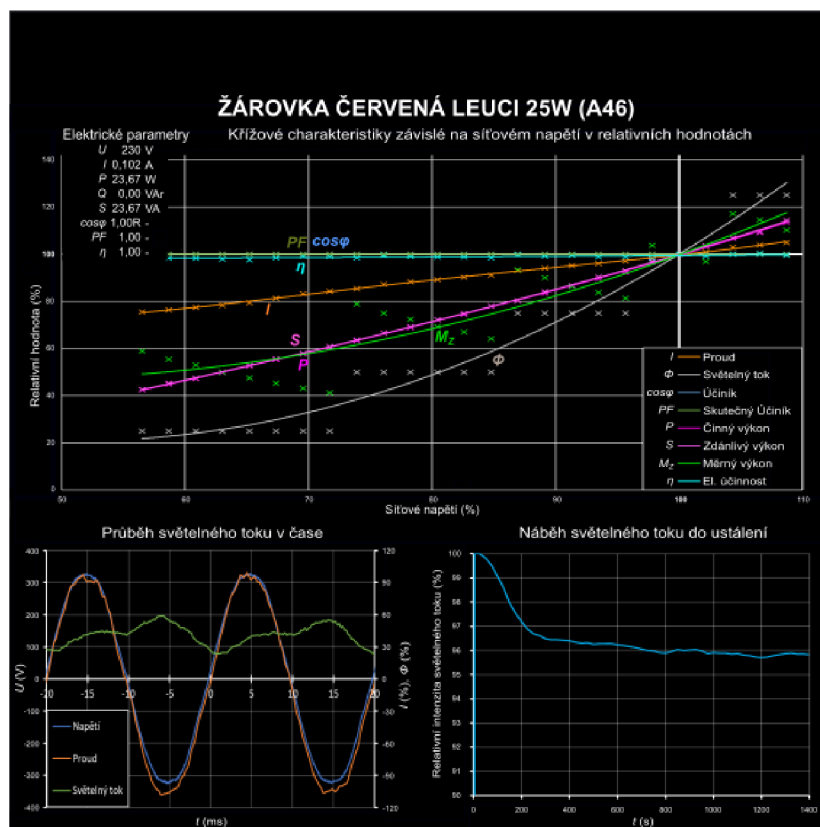
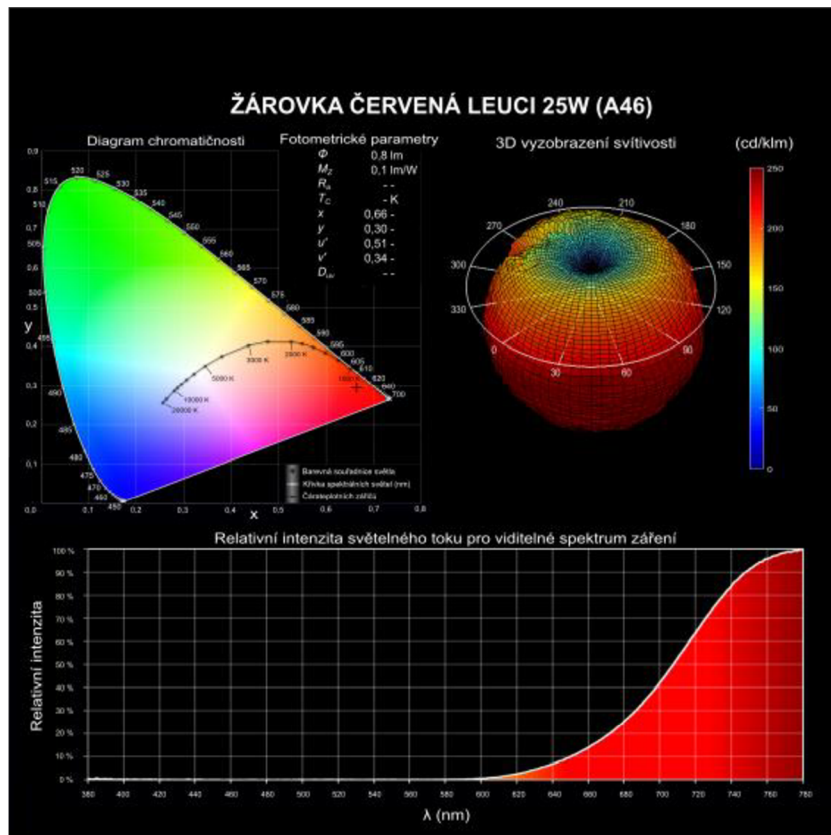
- A) Výsledné návrhy karet měřených SZ
- B) Světelná spektra měřených SZ
- C) Diagramy chromatičnosti měřených SZ
- D) 3D grafy svítivosti měřených SZ
- E) Náběhy světelných toků měřených SZ
- F) Průběhy světelných toků měřených SZ
- G) Křížové charakteristiky měřených SZ

A) Výsledné návrhy karet měřených SZ:

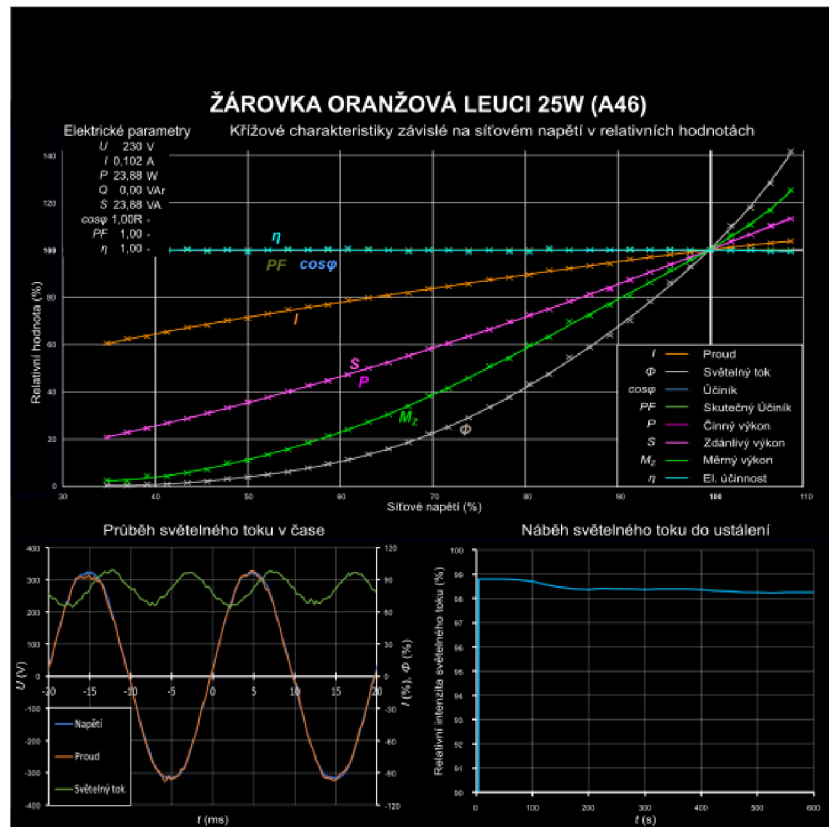
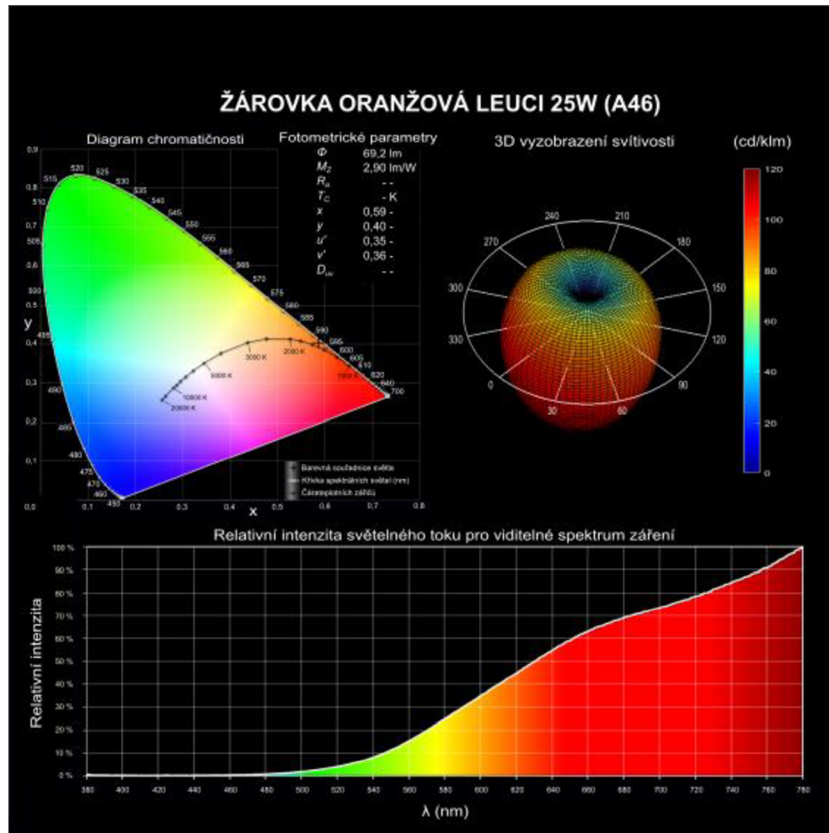
Zdroj č.1:



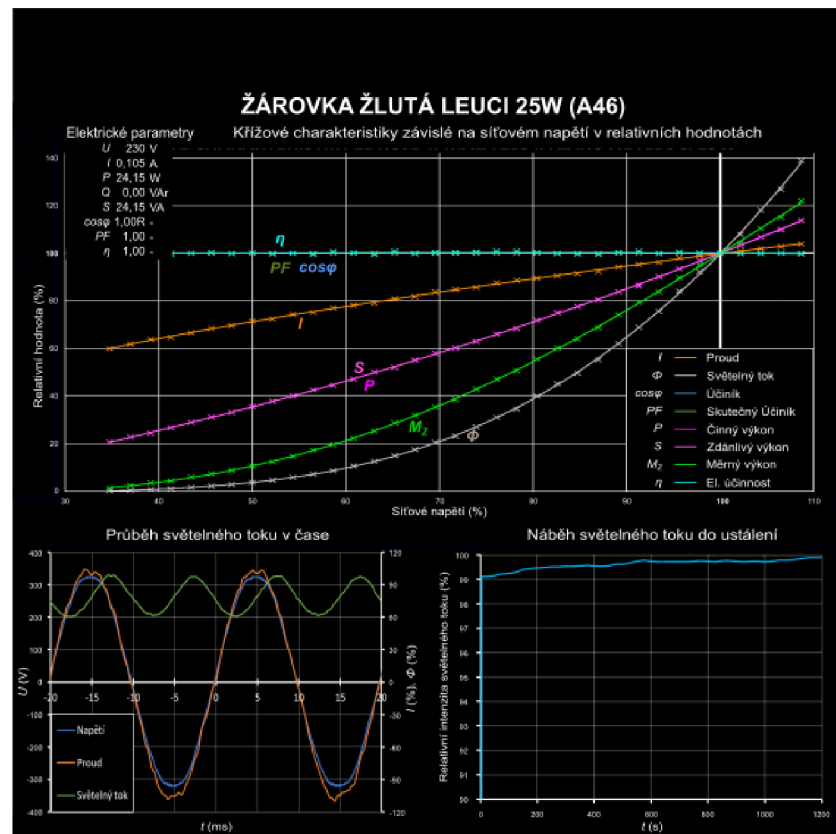
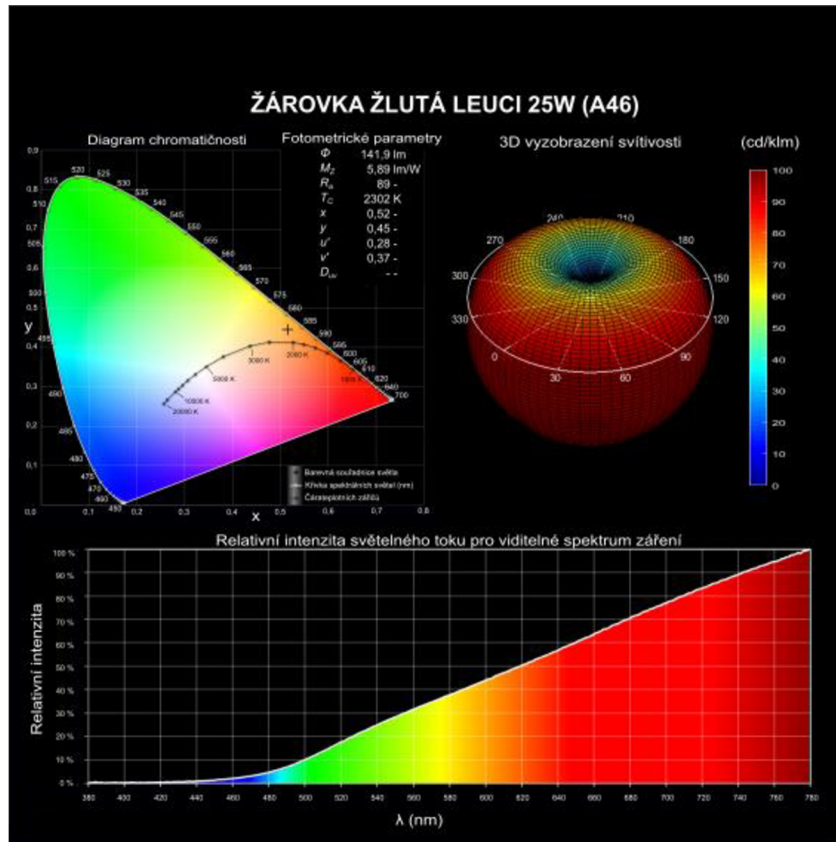
Zdroj č.2:



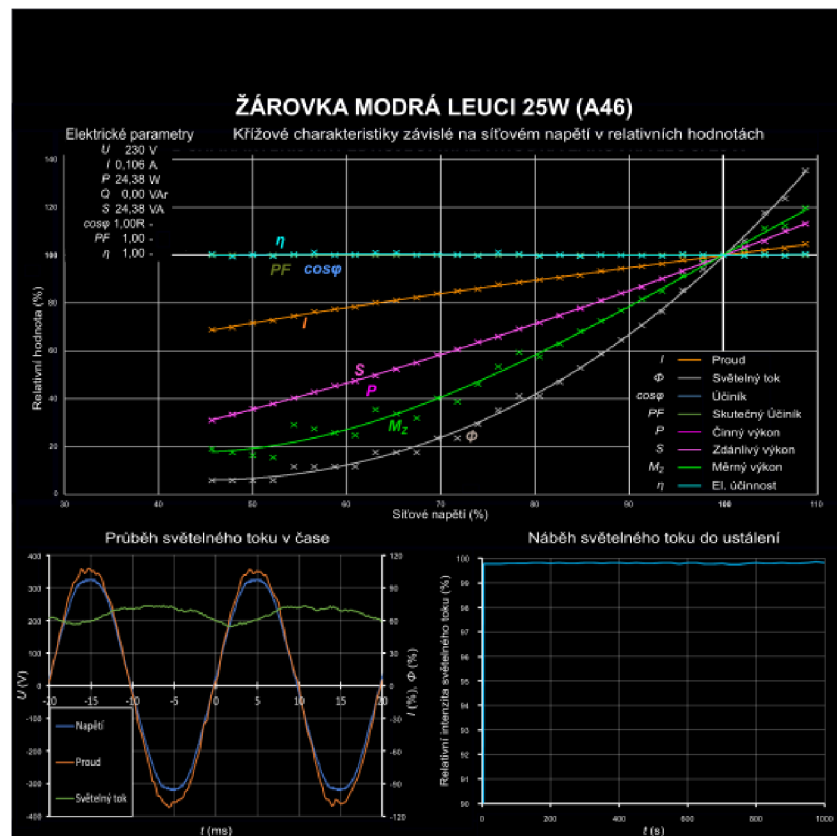
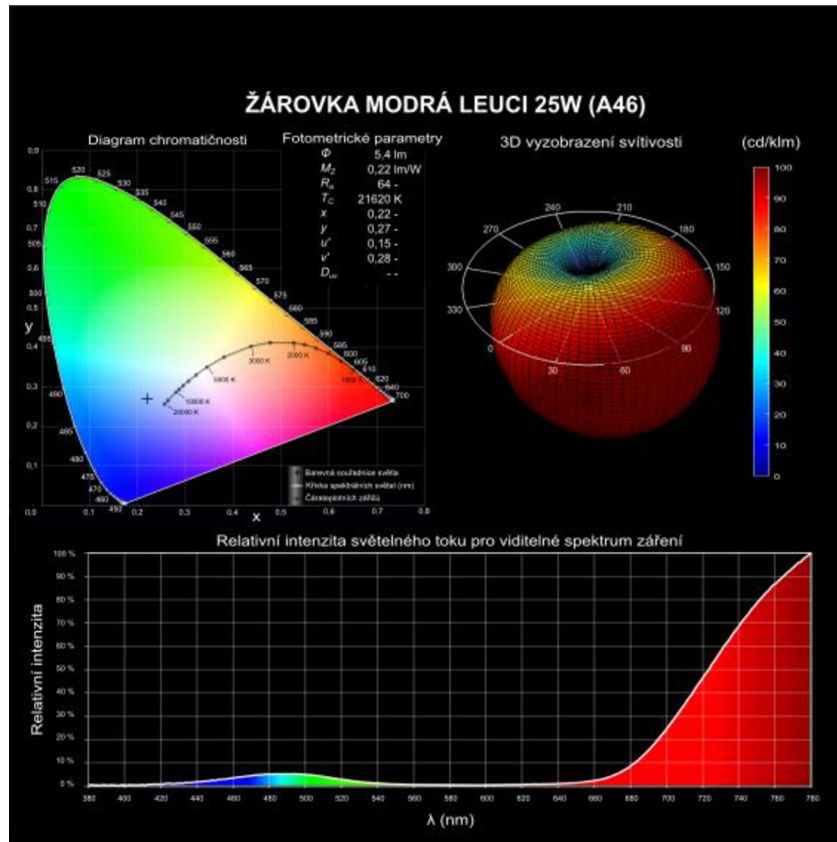
Zdroj č.3:



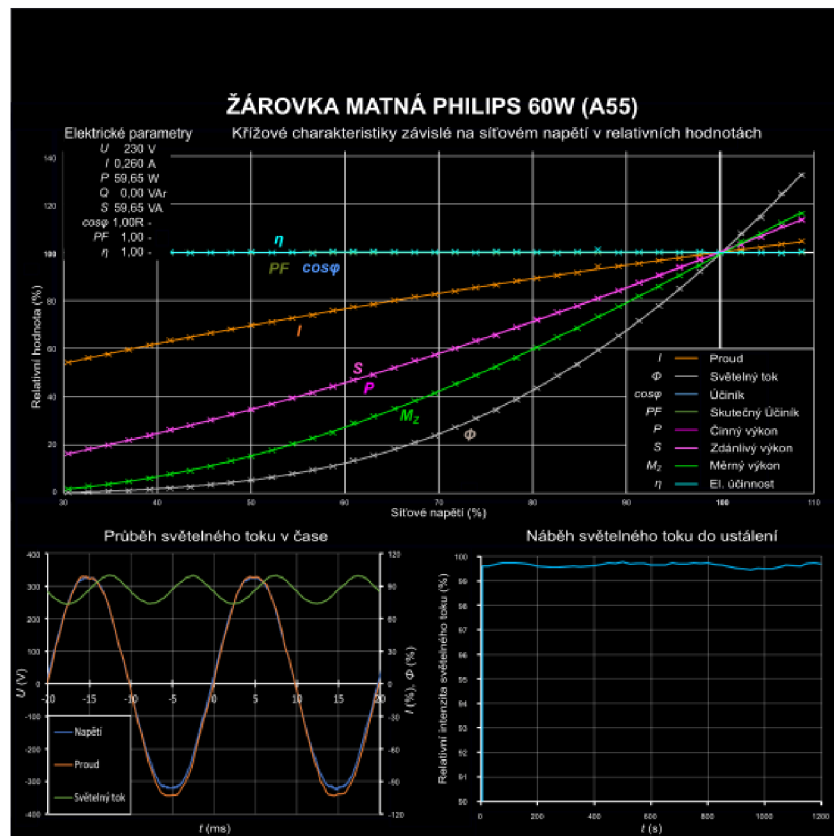
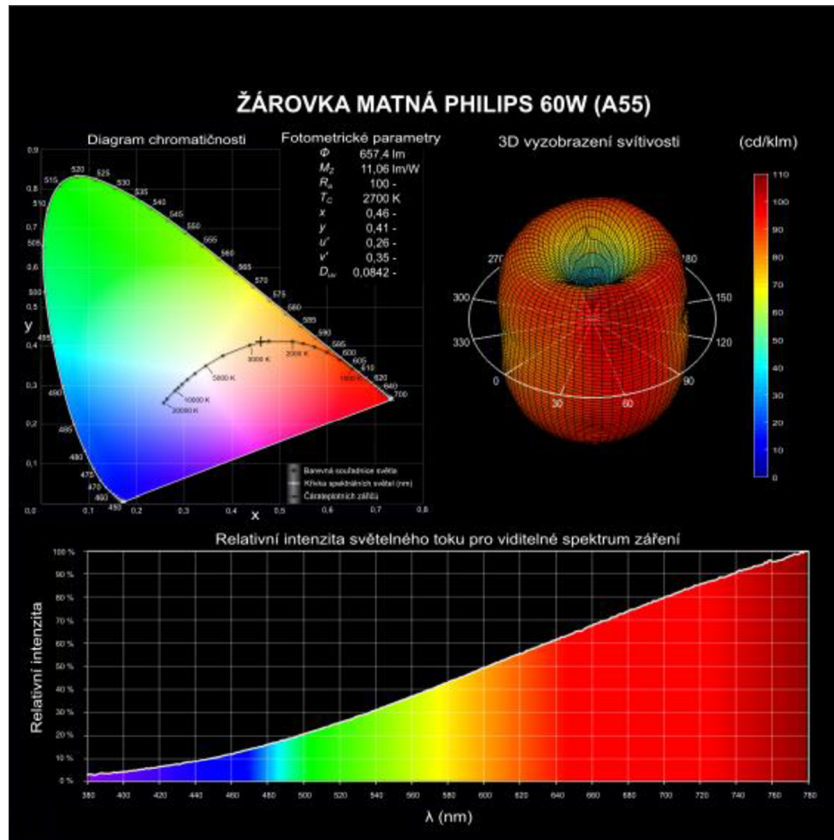
Zdroj č.4:



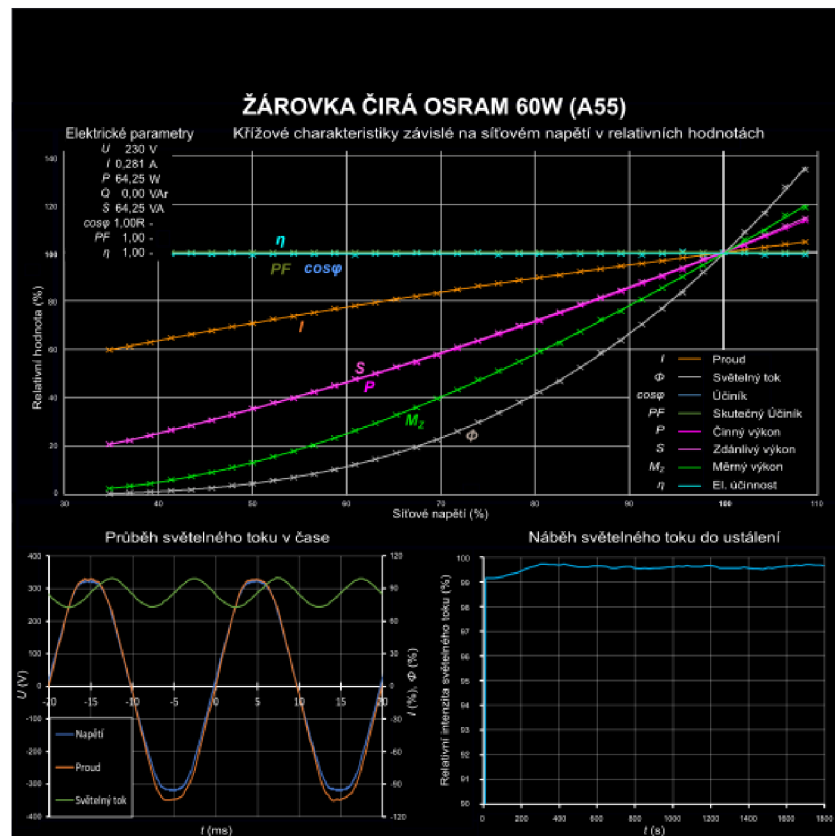
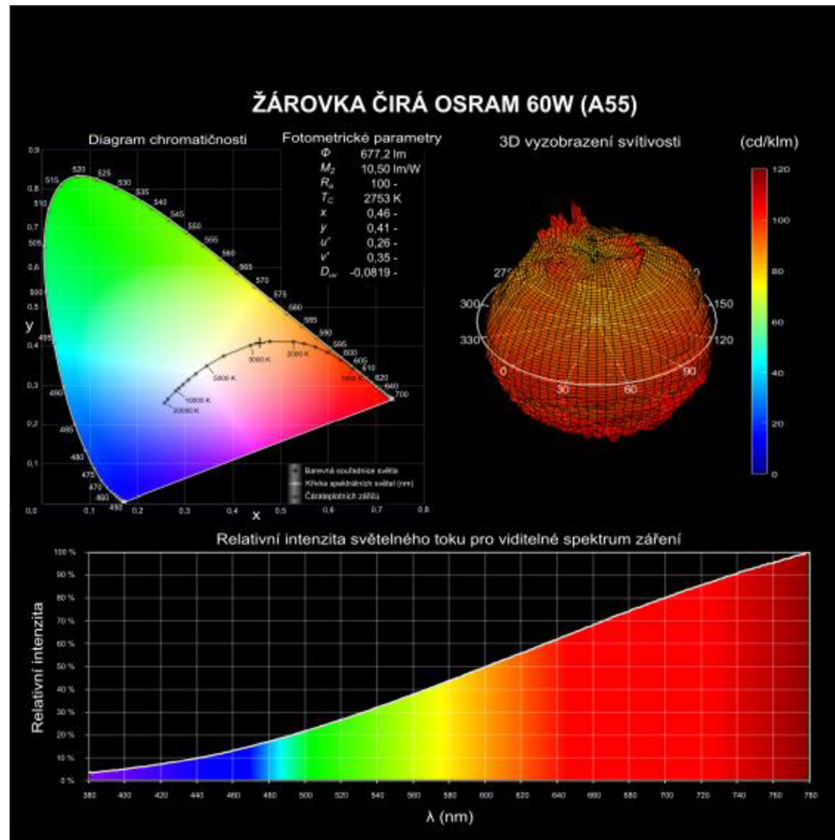
Zdroj č.5:



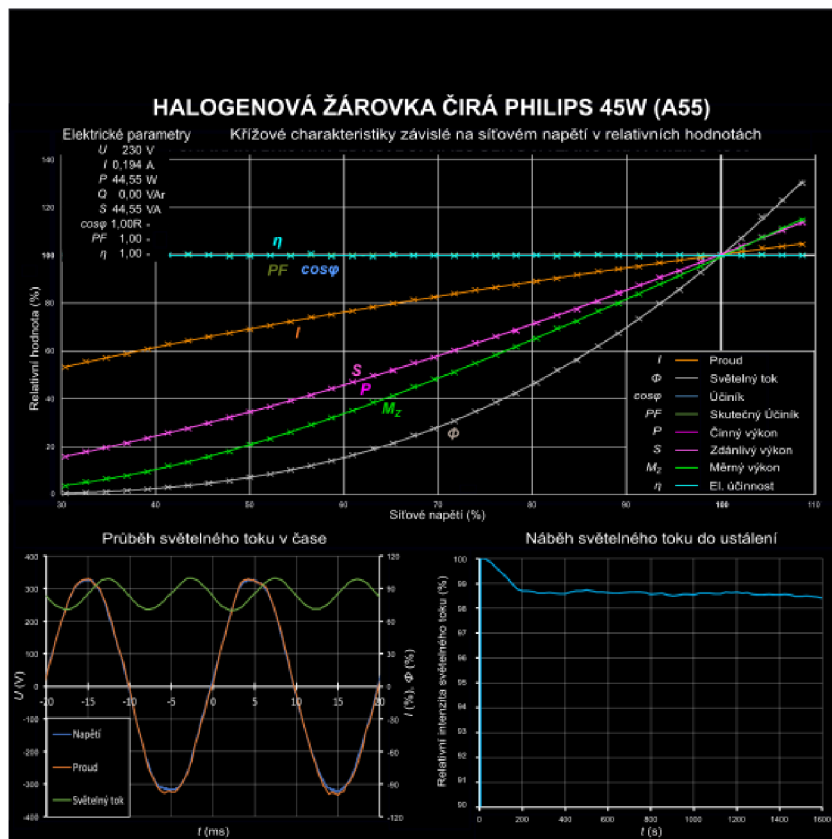
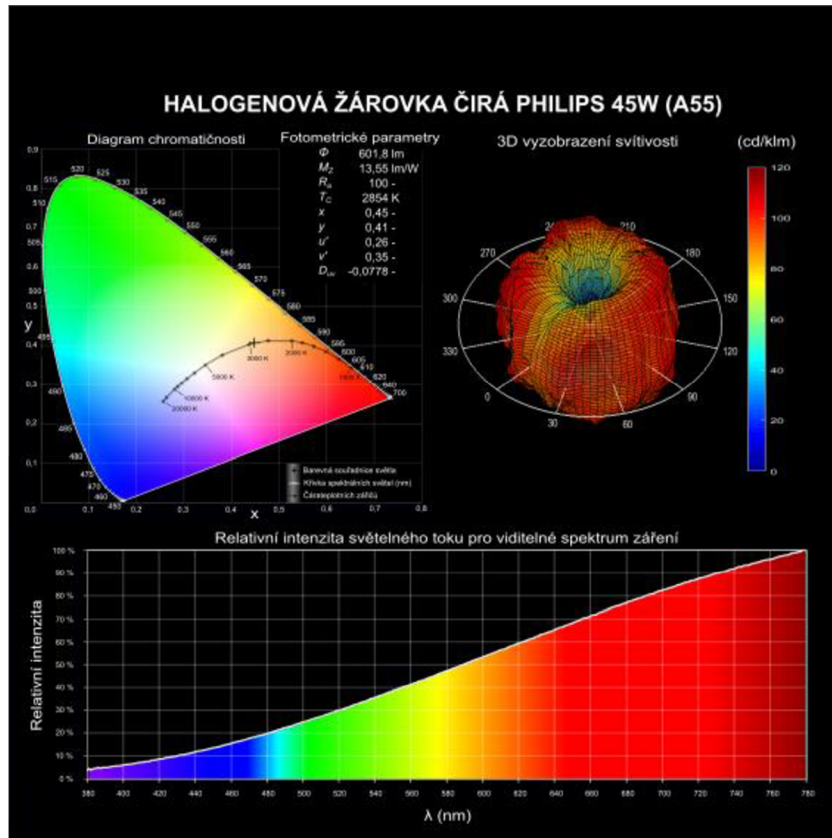
Zdroj č.6:



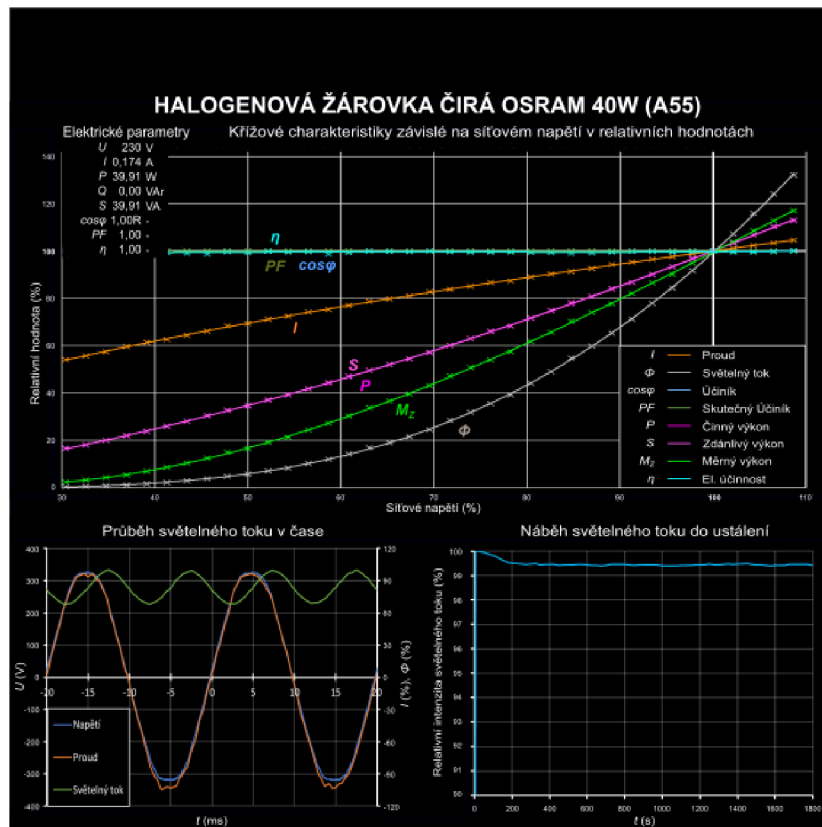
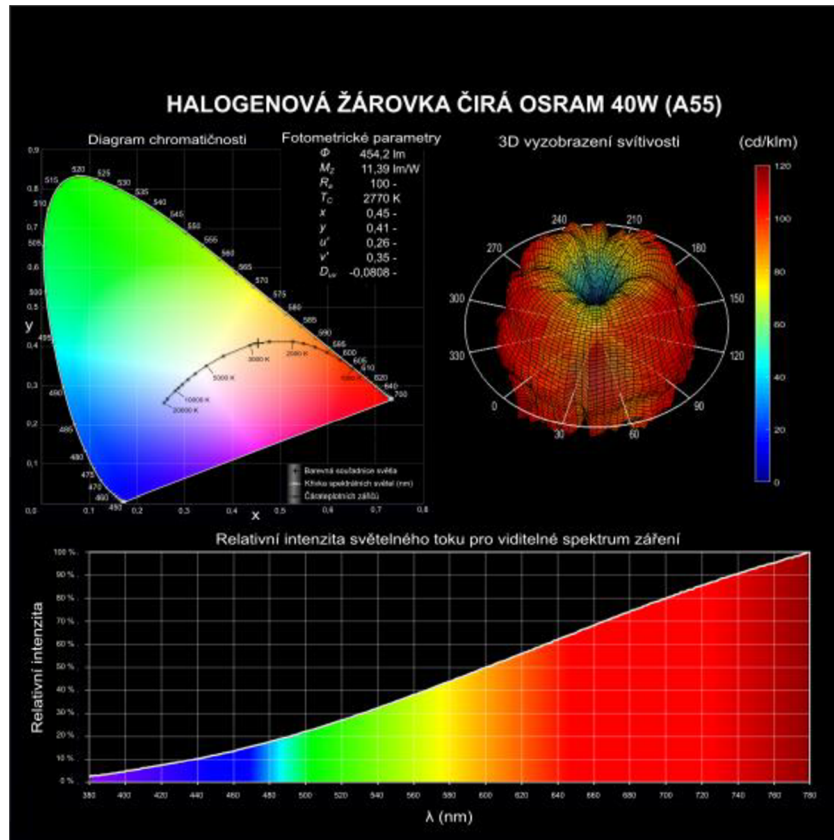
Zdroj č.7:



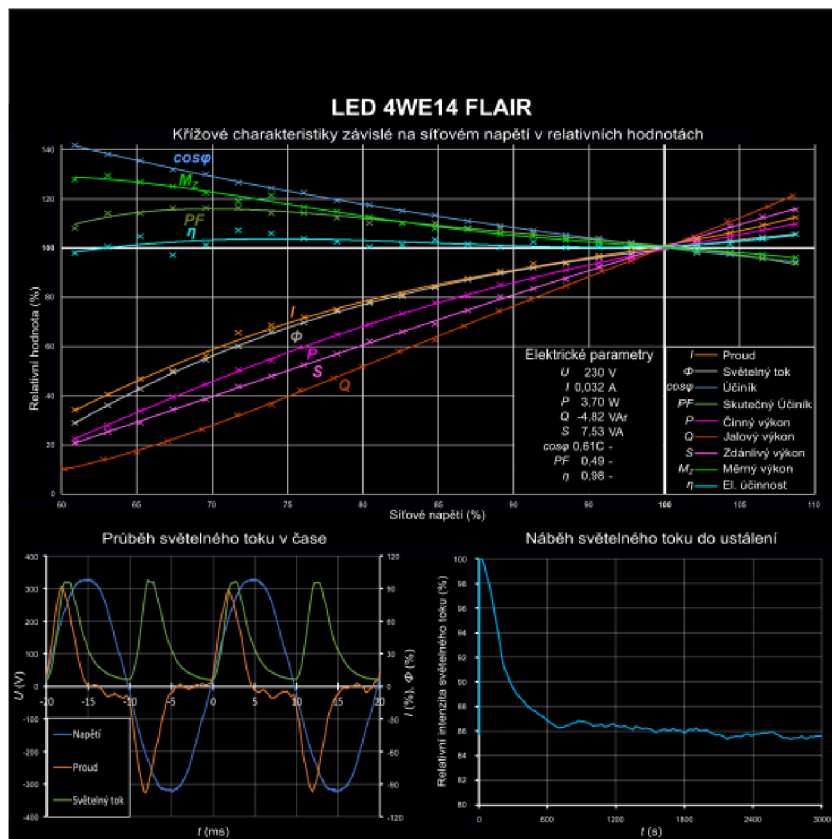
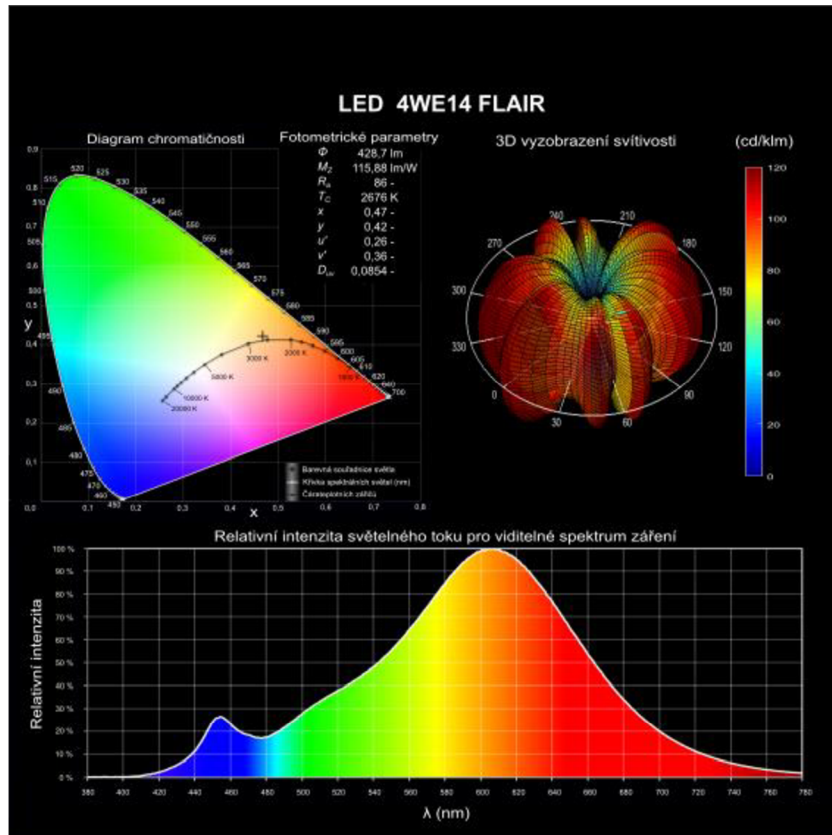
Zdroj č.8:



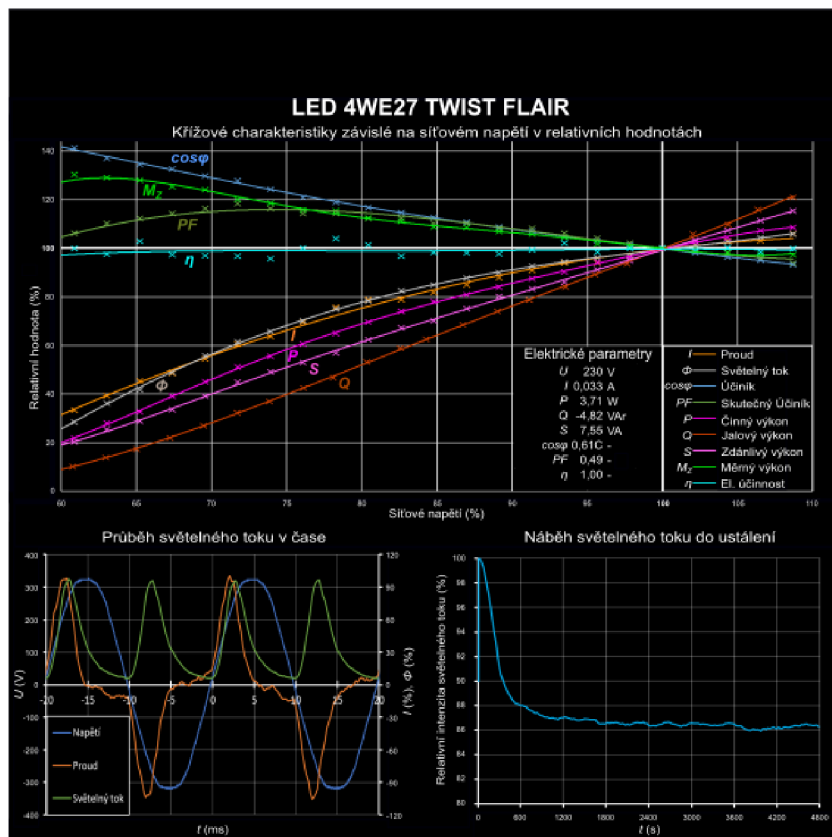
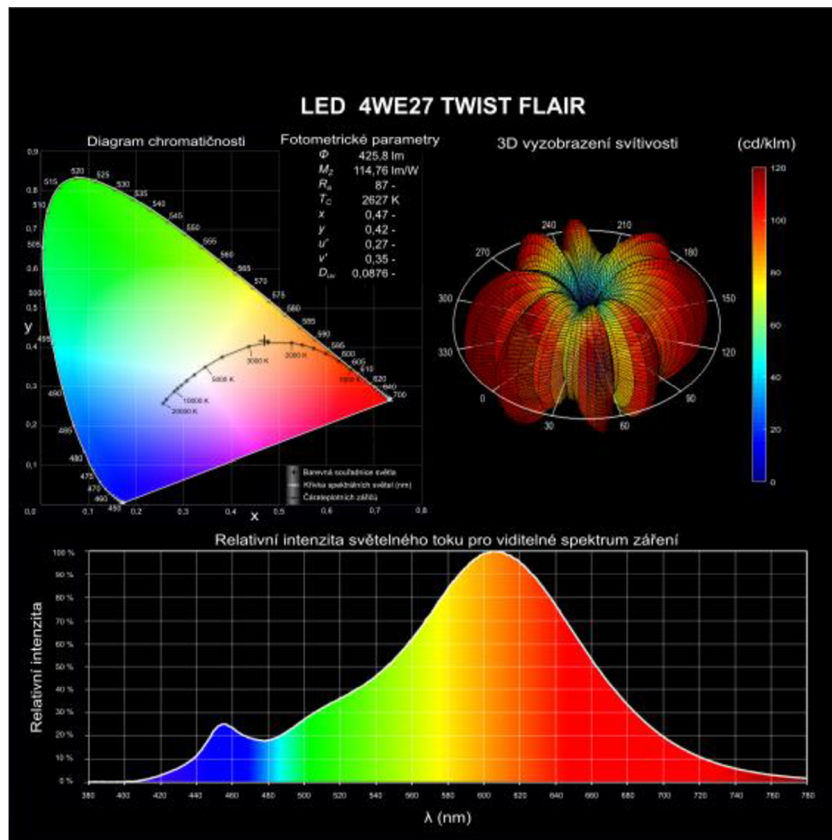
Zdroj č.9:



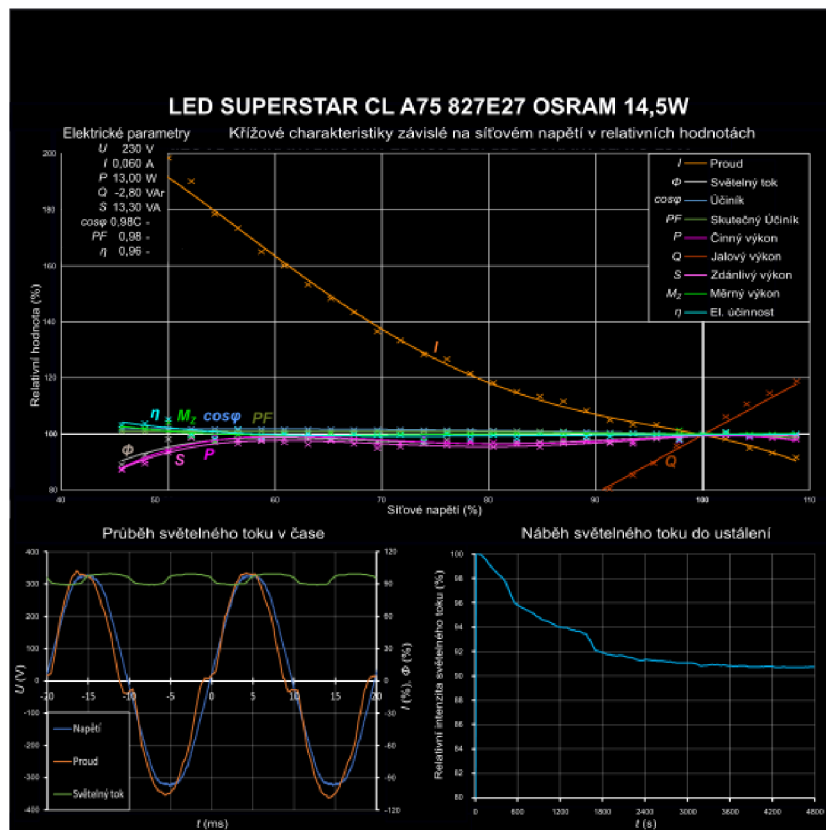
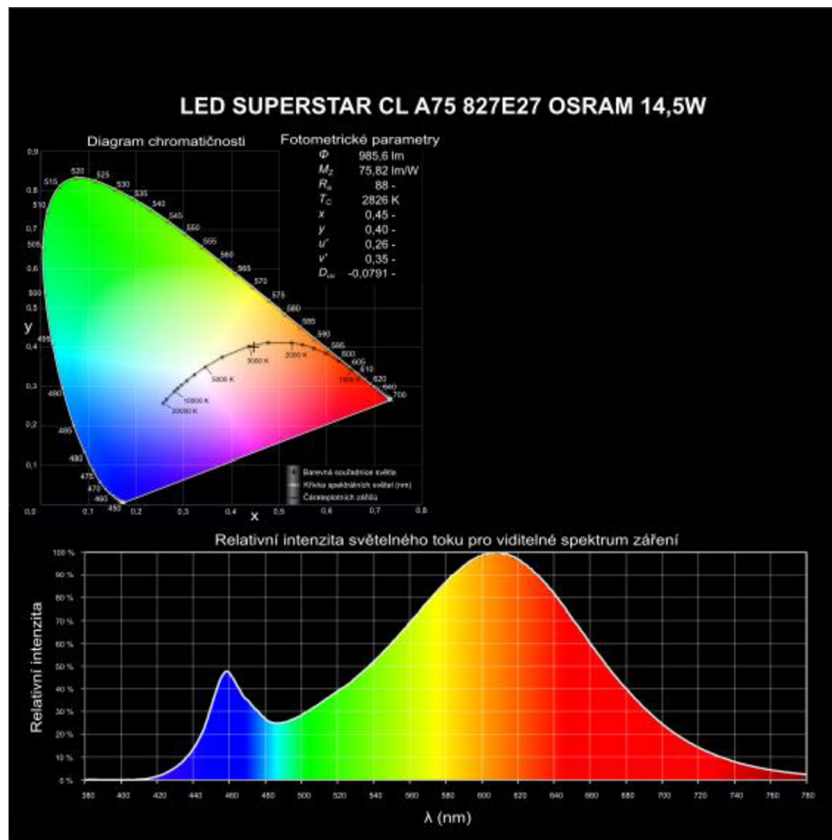
Zdroj č.10:



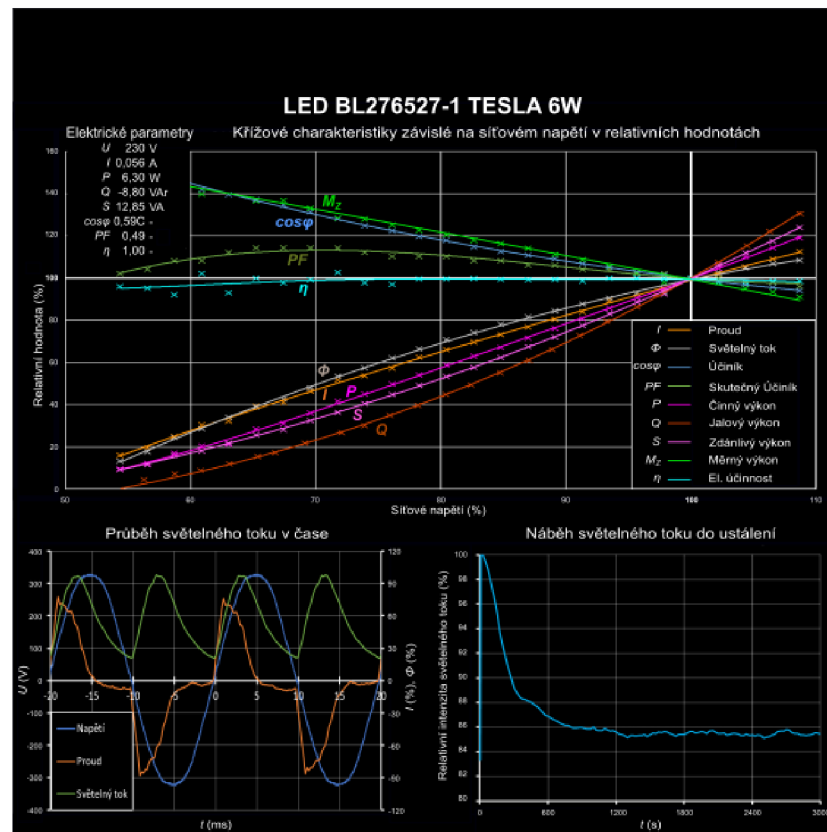
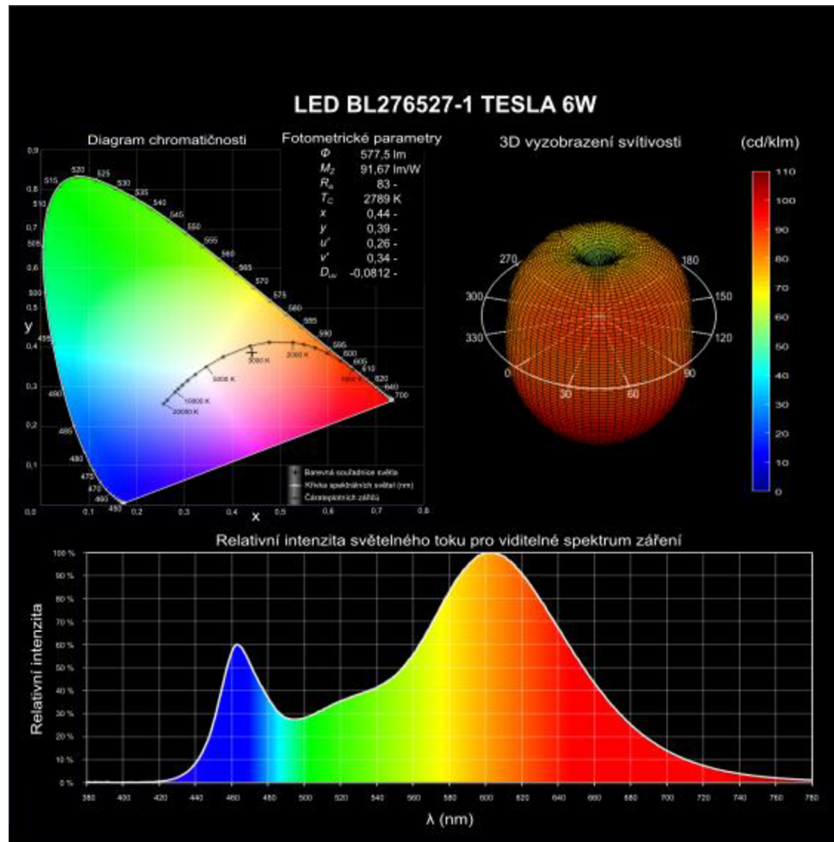
Zdroj č.11:



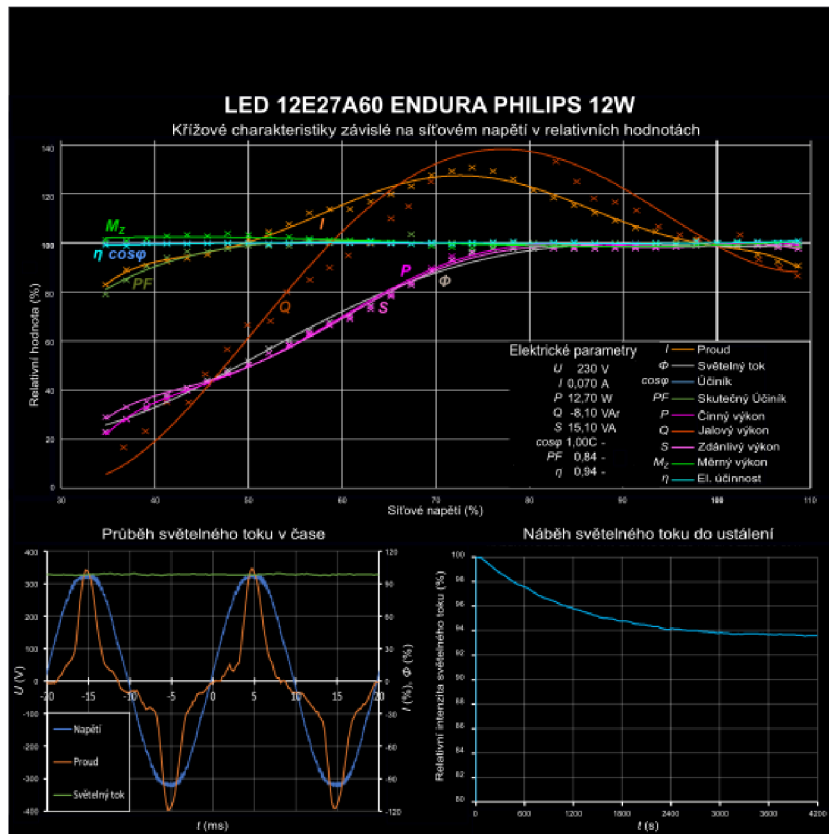
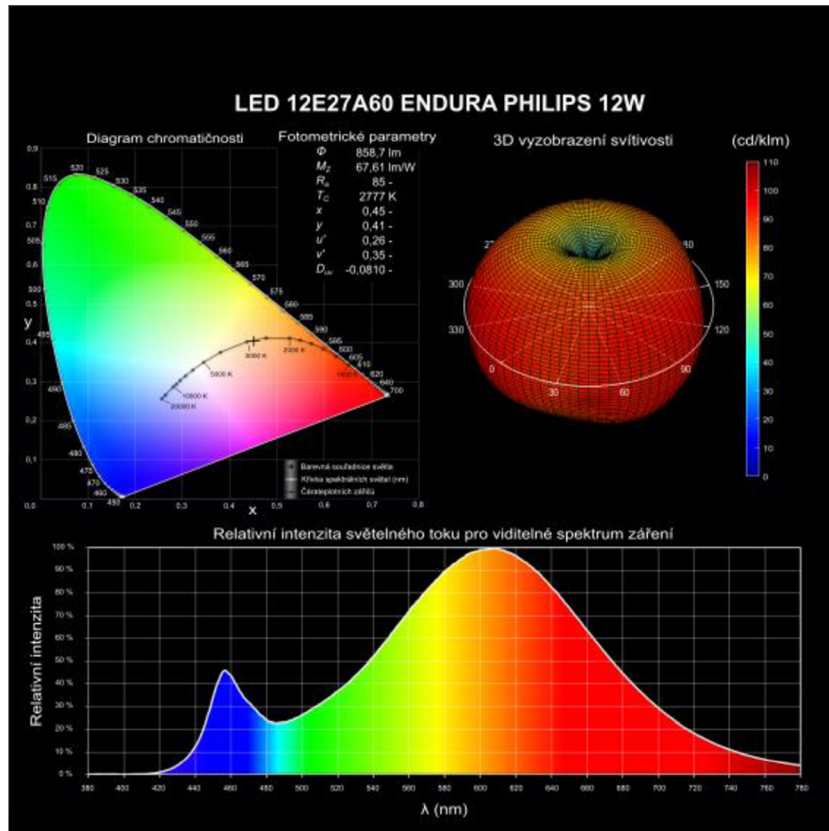
Zdroj č.12:



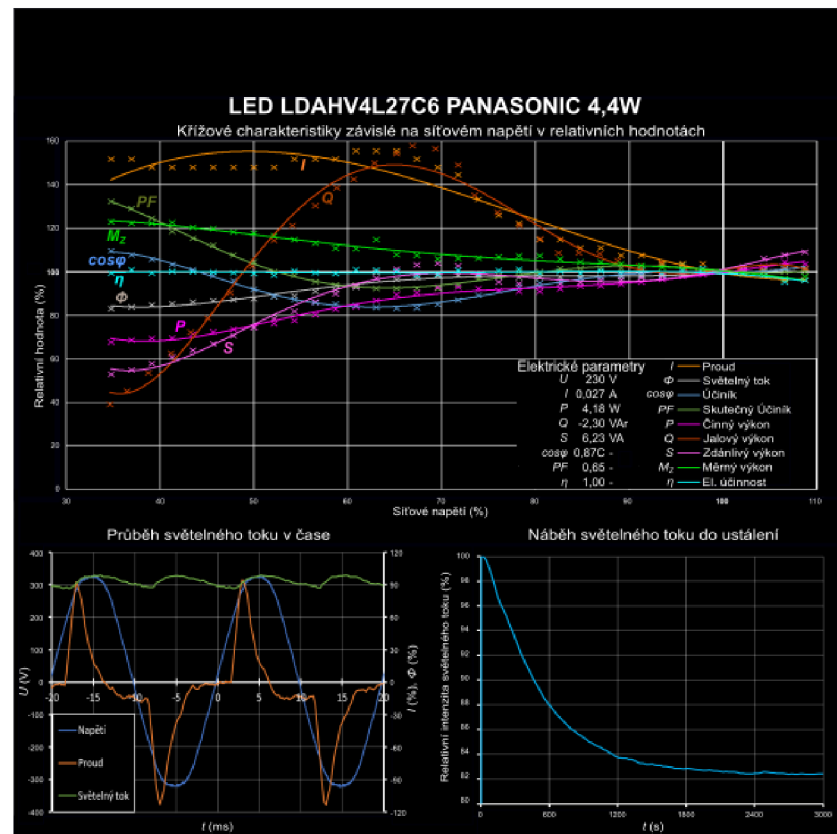
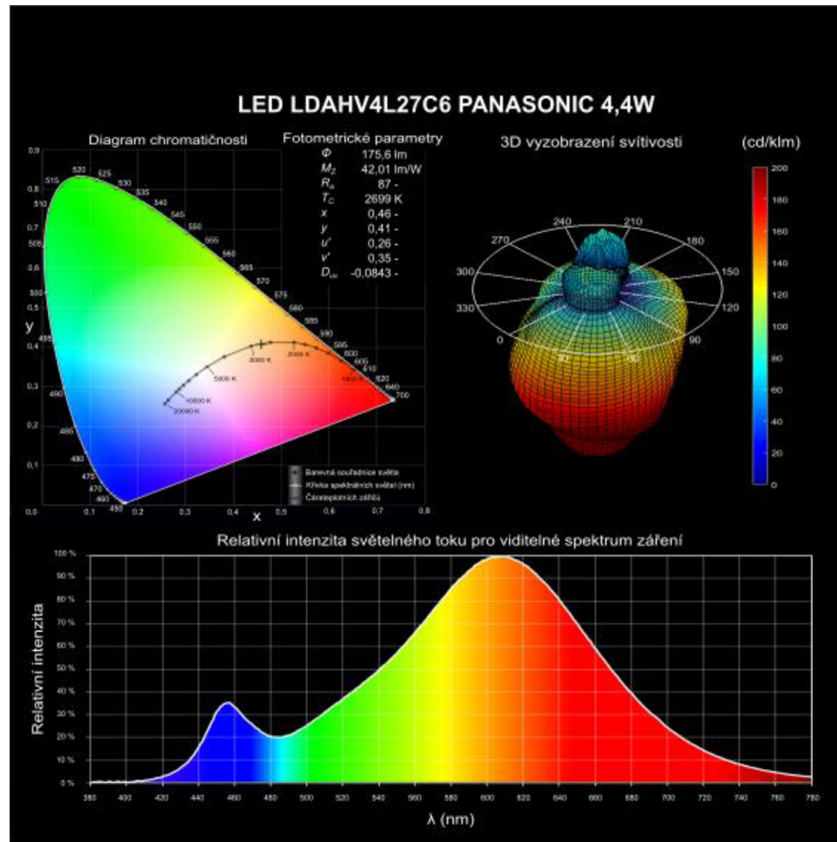
Zdroj č.13:



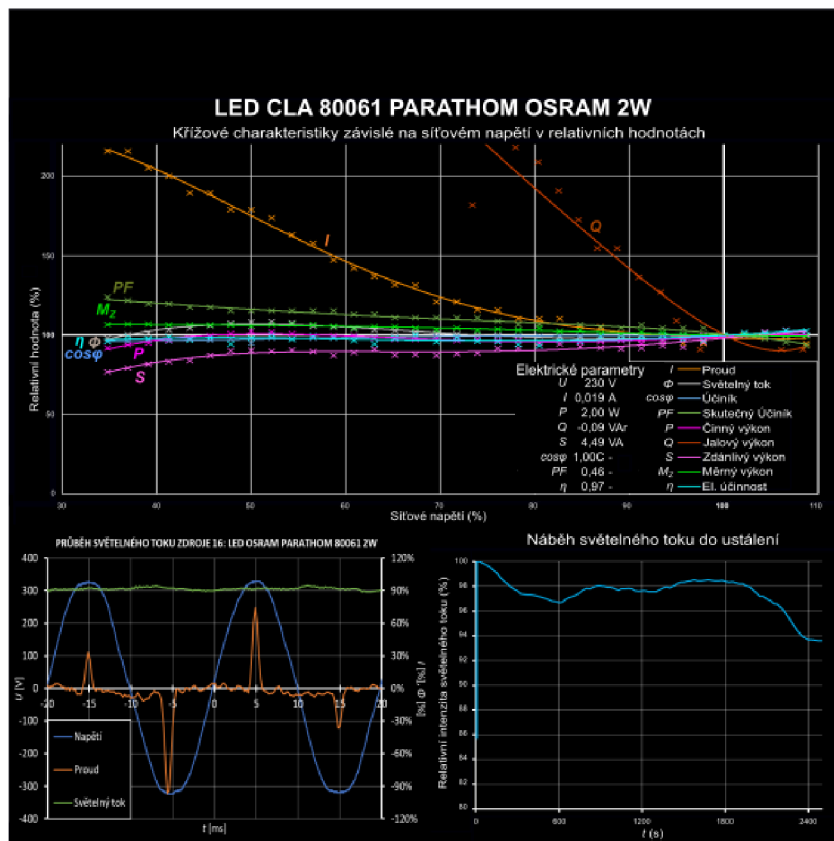
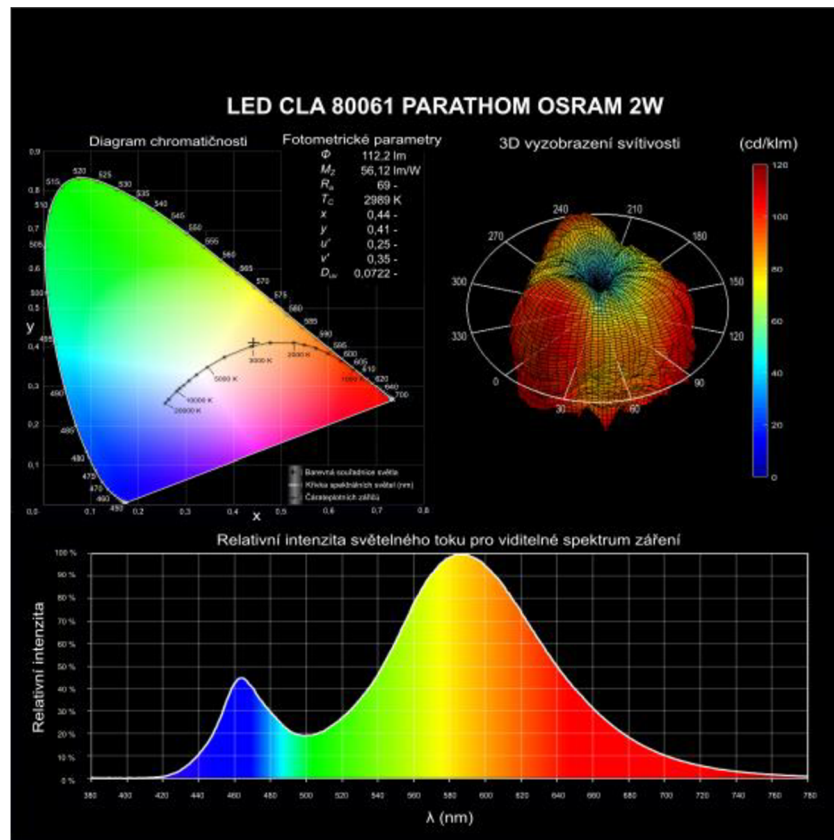
Zdroj č.14:



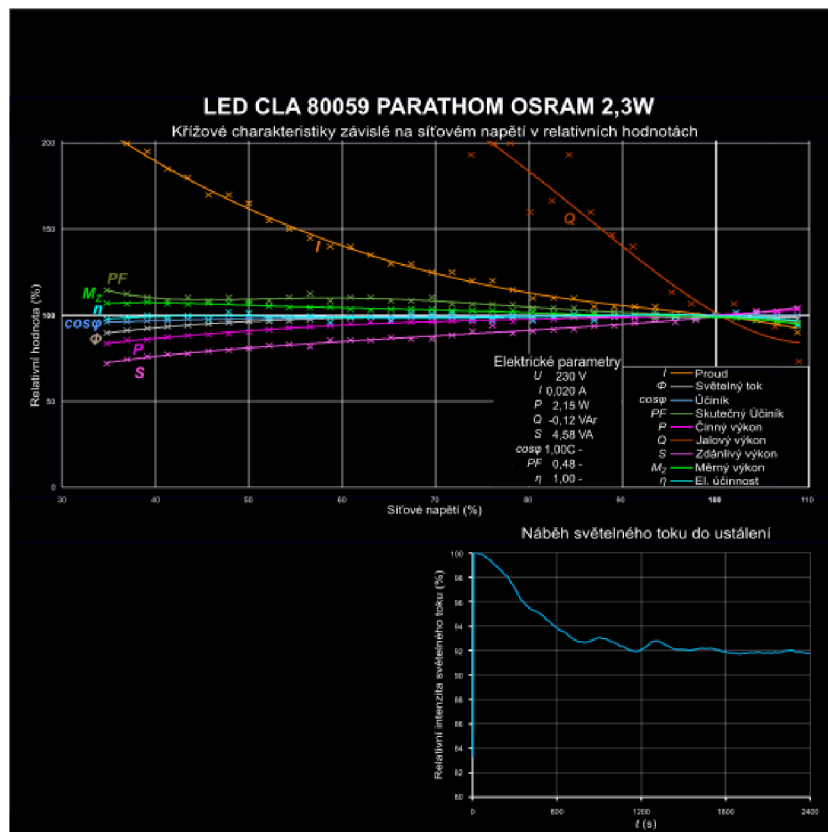
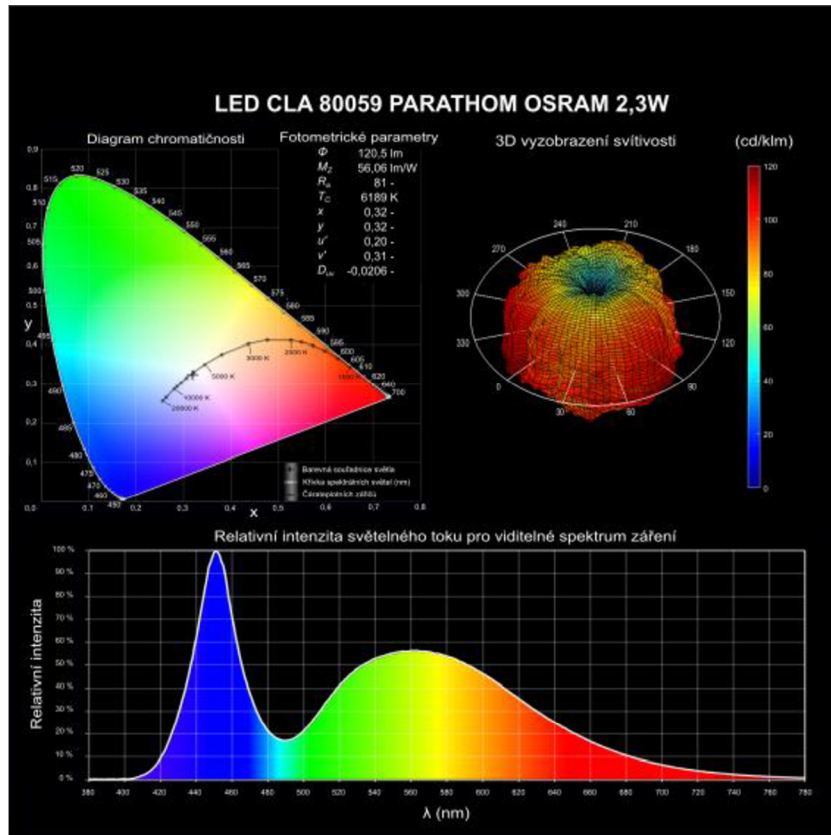
Zdroj č.15:



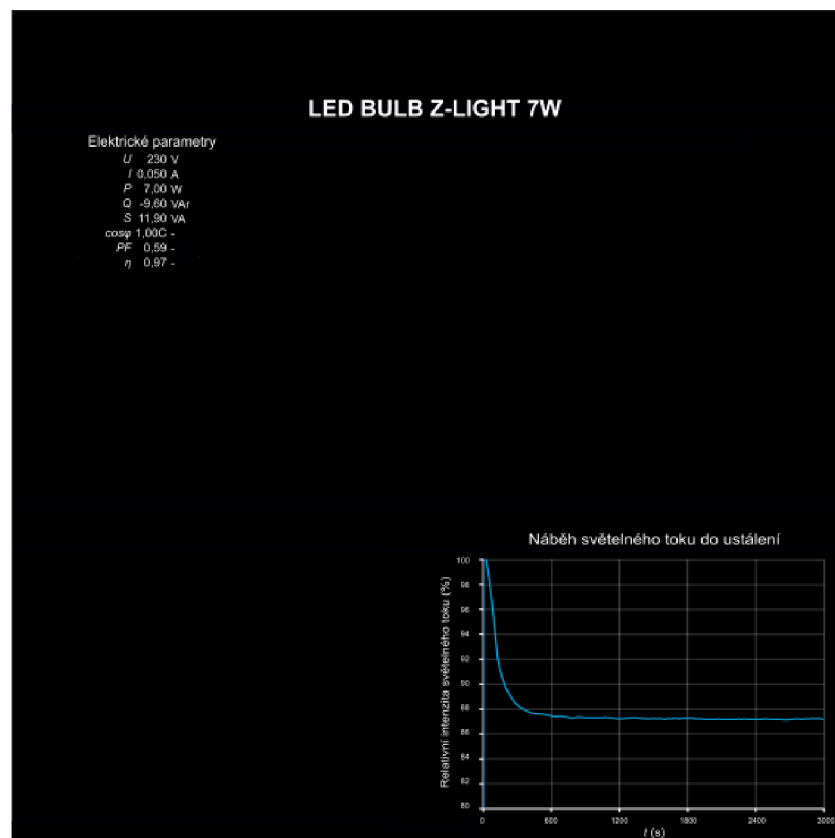
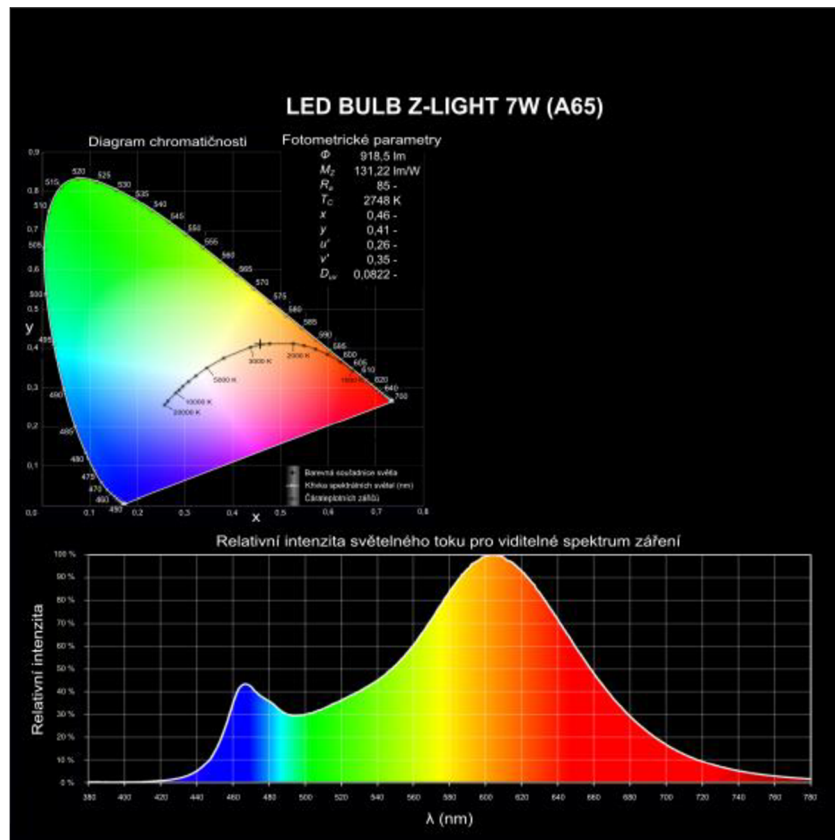
Zdroj č.16:



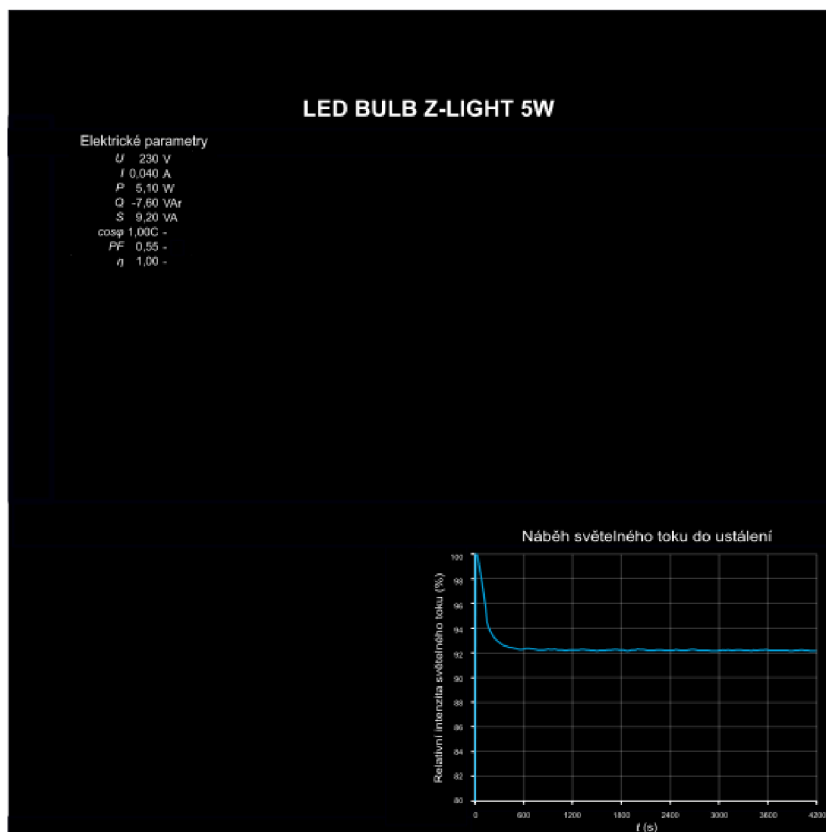
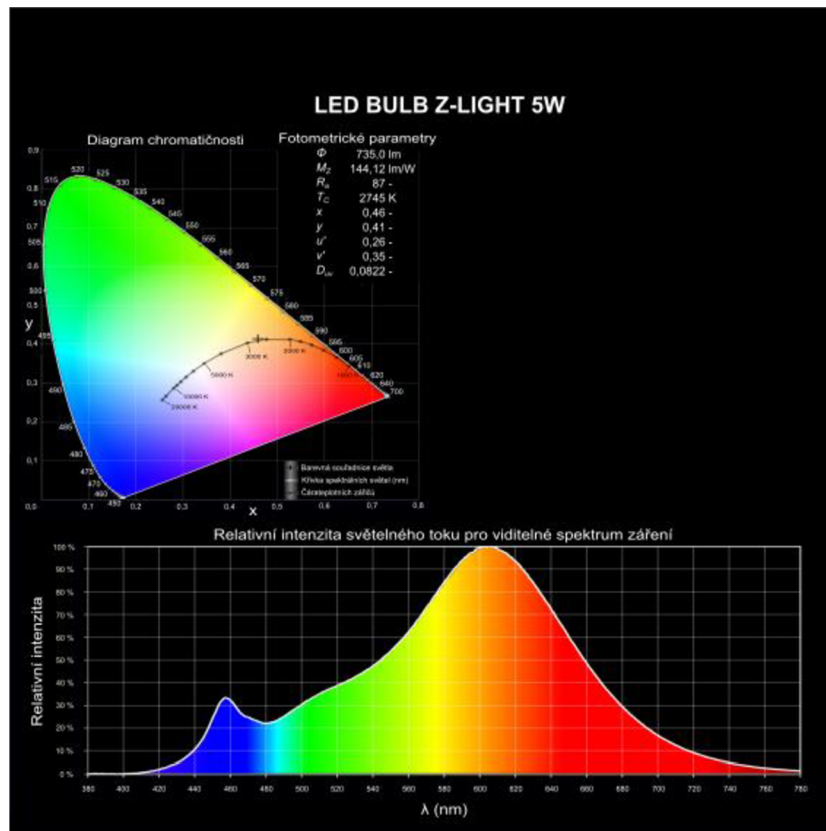
Zdroj č.17:



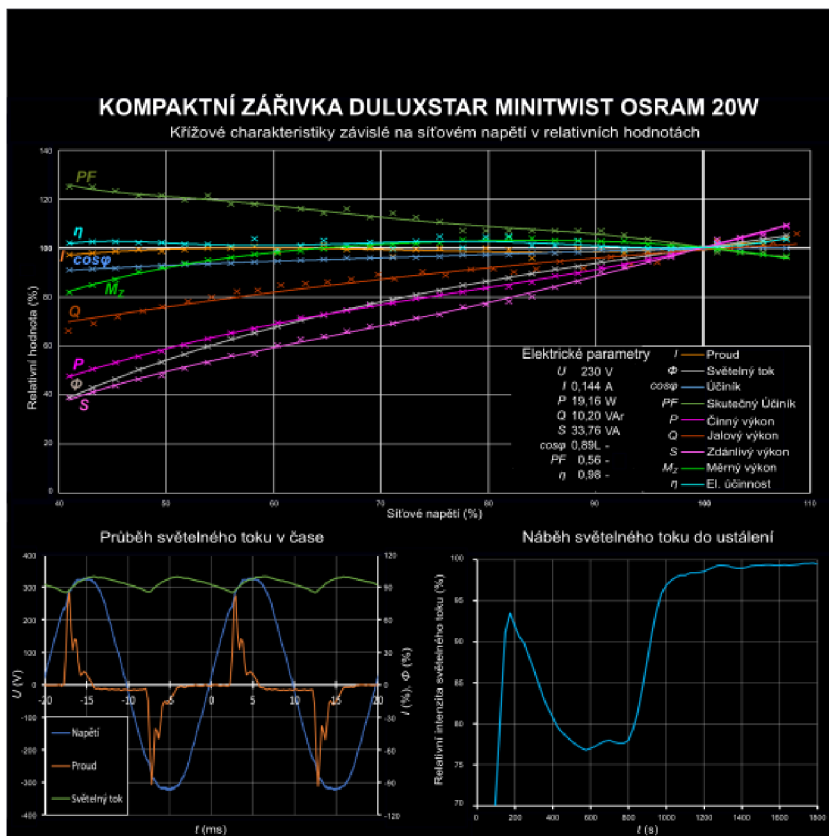
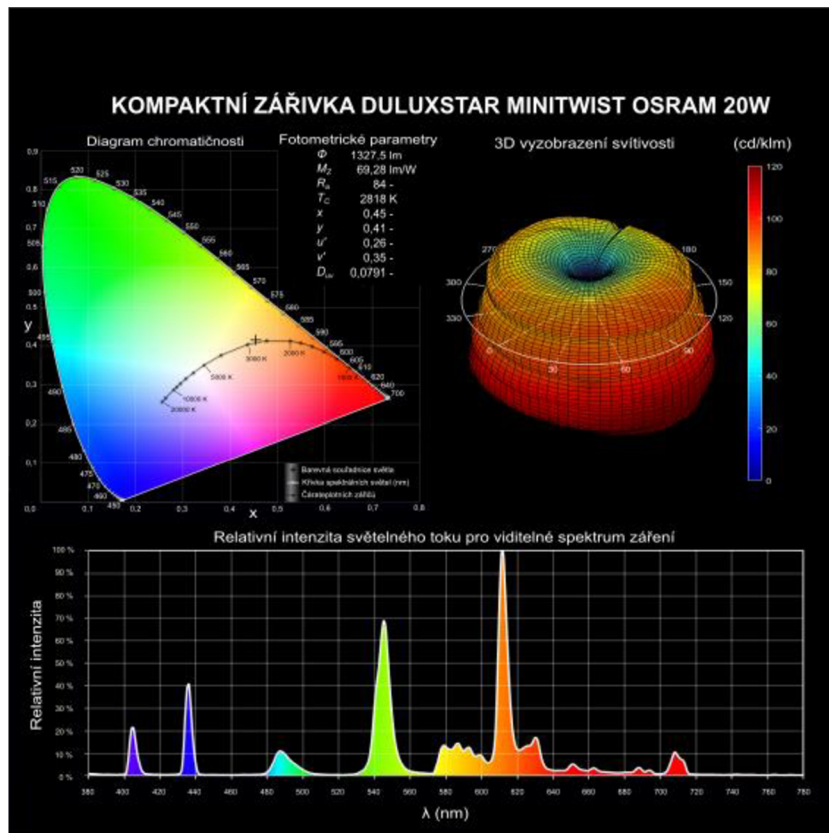
Zdroj č.18:



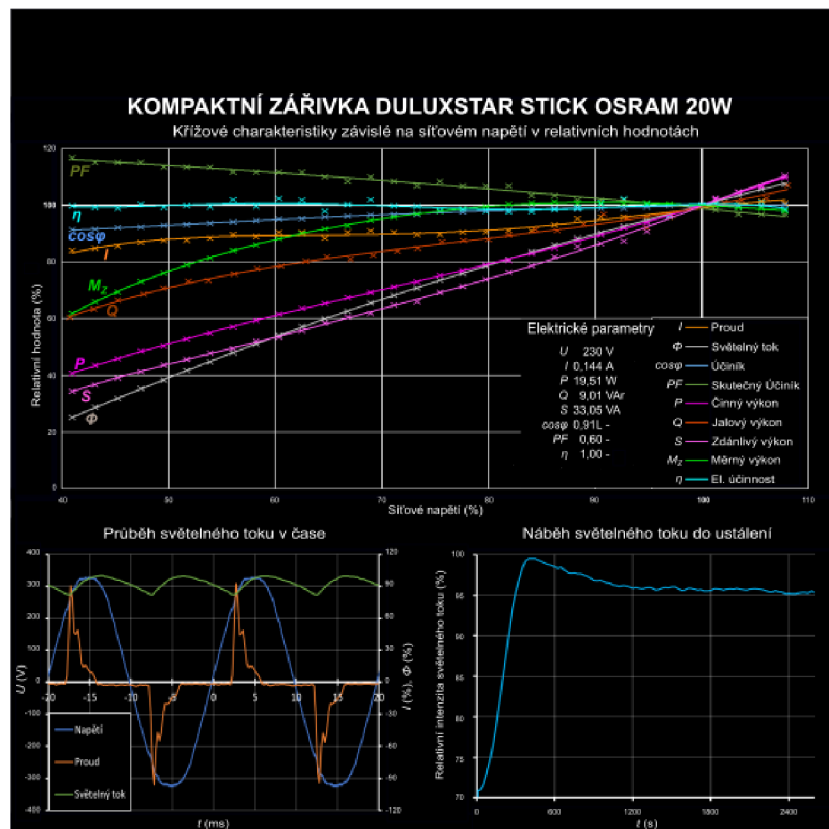
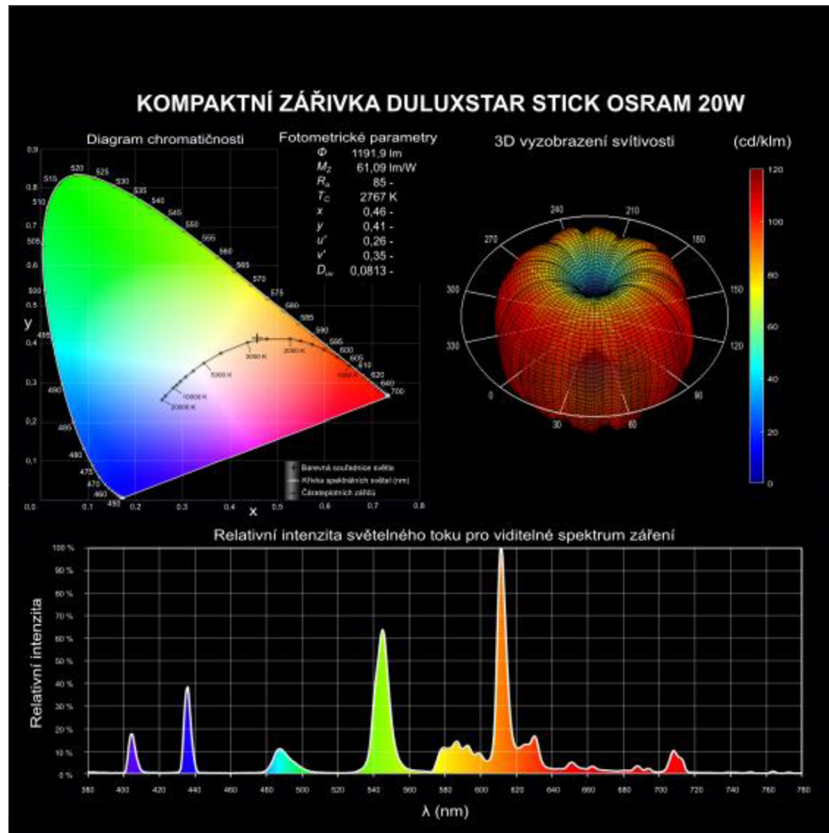
Zdroj č.19:



Zdroj č.20:



Zdroj č.21:



Zdroj č.22:

