



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

PROVOZNÍ PARAMETRY LED SVĚTELNÝCH ZDROJŮ

OPERATING PARAMETERS OF LED LIGHT SOURCES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Daniel Janík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marie Havlíková, Ph.D.

BRNO 2017

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Daniel Janík

ID: 136527

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Provozní parametry LED světelných zdrojů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vypracujte přehled používaných technologií a konstrukcí LED světelných zdrojů.
2. Navrhnete měřicí postupy pro ověřování elektrických a fotometrických parametrů světelných zdrojů při provozních a extrémních podmínkách provozu (zvýšené napětí, teplota). Měřicí postupy volte s ohledem na dostupné technické vybavení.
3. Provedte měření vybraných světelných zdrojů (dle pokynů konzultanta práce) podle postupů popsanych v bodě 2 zadání.
4. Naměřená data zpracujte a vyhodnoťte

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Bejček, L., Čejka, M., Rez, J.: Měření v elektrotechnice, Skripta VUT Brno, 2002
- [2] Baxant, P., Drápela, J.: Užití elektrické energie, Skripta VUT Brno, 2007

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 15.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Marie Havlíková, Ph.D.

Konzultant: Ing. Jaroslav Štěpánek

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Cílem této práce je seznámit se se základními veličinami ve fotometrii a provozními parametry LED světelných zdrojů, podle kterých se světelné zdroje posuzují a porovnávají. Práce zkoumá vliv vysoké teploty a zvýšeného napětí na LED retrofity a návrh měřicích metod, kterými se tyto vlivy dají změřit. Podle navržených metod bylo změřeno devět vzorků světelných zdrojů a byly mezi sebou na základě měření porovnány. Srovnávání bylo provedeno jak z hlediska energetického, tak z hlediska kvality produkovaného světla a to jak mezi sebou, tak s parametry, které udávají výrobci.

Klíčová slova

LED, retrofit, světelný zdroj, teplotní zkouška, LED modul, polovodič, konstrukce LED

Abstract

The aim of the thesis is to introduce the basic photometric quantities and operating parameters of LED light sources, according to which the light sources are evaluated and compared. The thesis examines effects of high temperature and elevated stress on LED retrofits and a design of measurement methods to measure these influences. According to the proposed methods, nine samples of light sources were measured and compared to each other on a basis of the measurements. Comparison was made from the point of view of the energy as well as the quality of the produced light. The results were also compared to the parameters specified by the producers.

Keywords

LED, retrofit, light source, temperature test, LED module, semiconductor, LED construction

Bibliografická citace:

JANÍK, D. *Provozní parametry LED světelných zdrojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 52s. Vedoucí diplomové práce: Ing. Marie Havlíková, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Provozní parametry LED světelných zdrojů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne 14. května 2017

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucí diplomové práce Ing. Marii Havlíkové, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále děkuji konzultantovi práce Ing. Jaroslavu Štěpánkovi za odborné rady a připomínky a Ing. Janu Škodovi, Ph.D. za poskytnutí laboratoře světelné techniky na UEEN FEKT VUT v Brně.

V Brně dne 14. května 2017

.....
podpis autora

Obsah

Úvod	1
1 Světlo	2
1.1 Vznik světla	3
1.2 Barevné vlastnosti světla.....	3
1.3 Základní dělení světelných zdrojů	5
2 LED světelné zdroje	7
2.1 Polovodiče	8
2.2 Elektroluminiscence	9
2.3 Způsoby výroby bílé LED.....	11
2.4 Typy používaných pouzder LED	13
2.5 Chlazení LED zdrojů.....	16
2.6 Obecné vlivy prostředí na LED	17
2.7 Zdroje pro LED moduly a LED retrofity	18
3 Měřicí metody	19
3.1 Provozní parametry světelných zdrojů.....	19
3.2 Extrémní provozní podmínky.....	22
3.3 Měření základních fotometrických veličin.....	23
3.4 Tepelná zkouška LED světelných zdrojů	25
3.5 Napěťové vlivy na LED světelné zdroje	25
4 Vyhodnocení měření	27
4.1 Popis experimentu	27
4.2 Přehled provozních parametrů světelných zdrojů.....	28
4.3 Spektrum měřených LED světelných zdrojů.....	28
4.4 Vývoj parametrů v čase po připojení měřených LED světelných zdrojů k napájení.....	35
4.5 Teplotní zkouška měřených LED světelných zdrojů.....	38
4.6 Závislost parametrů LED světelných zdrojů na napájecím napětí	41
4.7 Srovnání změřených parametrů s parametry výrobců.....	44
5 Diskuze výsledků měření.....	48
Závěr.....	49
Literatura	50
Seznam příloh.....	52

Seznam obrázků

Obrázek 1: Spektrální citlivost normálního fotometrického pozorovatele dle CIE 1931 [1]	2
Obrázek 2: Rozložení barevných tónů ve spektru [2]	2
Obrázek 3: Ukázka aditivního (a) a subtraktivního (b) míchání barev[3]	4
Obrázek 4: Základní dělení světelných zdrojů [2]	6
Obrázek 5: Vývoj měrného světelného výkonu světelných zdrojů [6]	7
Obrázek 6: Znázornění atomové mřížky polovodiče typu N a typu P [9]	9
Obrázek 7: Struktura elektroluminiscenční diody [12]	10
Obrázek 8: Emisní spektrum vybraných barevných LED [8]	11
Obrázek 9: Emisní spektrum bílé LED (luminofor buzený bílou LED) [8]	12
Obrázek 10: Srovnání typů LED pouzder [14]	13
Obrázek 11: Popis DIP LED [15, přeloženo]	13
Obrázek 12: Popis pouzdra RGB SMD LED [15, přeloženo]	14
Obrázek 13: Popis pouzdra COB LED [15, přeloženo]	15
Obrázek 14: Popis a příklady pouzder MCOB LED [15, přeloženo]	15
Obrázek 15: Popis jednotlivých vrstev pouzdra Filament LED a finální produkt [16, přeloženo] [20]	16
Obrázek 16: Závislost parametrů LED na teplotě okolí [22]	17
Obrázek 17: Konstrukce LED retrofitu [21]	18
Obrázek 18: Měřicí řetězec pro měření světelně technických parametrů a elektrických parametrů při jmenovitém napájecím napětí spektrometrem CS-1000A a analyzátozem sítě SMP44, KMB SYSTEMS	24
Obrázek 19: Měřicí řetězec měření teplot světelného zdroje v teplotní komoře v jednotlivých bodech světelného zdroje	25
Obrázek 20: Spektrum vyzařované zdrojem 1 po zapnutí a po ustálení hodnot, před a po tepelné zkoušce, změřeno spektrometrem JETI specbos 1211UV	30
Obrázek 21: Spektrum vyzařované zdrojem 2 po zapnutí a po ustálení hodnot, před a po tepelné zkoušce, změřeno spektrometrem JETI specbos 1211UV	30
Obrázek 22: Spektrum vyzařované zdrojem 3.1 po zapnutí a po ustálení hodnot, před a po tepelné zkoušce, změřeno spektrometrem JETI specbos 1211UV	31
Obrázek 23: Spektrum vyzařované zdrojem 3.2 po zapnutí a po ustálení hodnot, před a po tepelné zkoušce, změřeno spektrometrem JETI specbos 1211UV	32

Obrázek 24: Spektrum vyzařované zdrojem 4 po zapnutí a po ustálení hodnot, změřeno spektrometrem JETI specbos 1211UV	32
Obrázek 25: Spektrum vyzařované zdrojem 5 po zapnutí a po ustálení hodnot, před a po tepelné zkoušce, změřeno spektrometrem JETI specbos 1211UV	33
Obrázek 26: Spektrum vyzařované zdrojem 6.1 po zapnutí a po ustálení hodnot, před a po tepelné zkoušce, změřeno spektrometrem JETI specbos 1211UV	33
Obrázek 27: Spektrum vyzařované zdrojem 6.2 po zapnutí a po ustálení hodnot, před a po tepelné zkoušce, změřeno spektrometrem JETI specbos 1211UV	34
Obrázek 28: Spektrum vyzařované zdrojem 7 po zapnutí a po ustálení hodnot, změřeno spektrometrem JETI specbos 1211UV	34
Obrázek 29: Vývoj světelného toku zdrojů po zapnutí před tepelnou zkouškou, změřeno spektrometrem JETI specbos 1211UV	35
Obrázek 30: Vývoj světelného toku zdrojů v čase po zapnutí po tepelné zkoušce, změřeno spektrometrem JETI specbos 1211UV	36
Obrázek 31: Vývoj teploty chromatičnosti zdrojů v čase po zapnutí, změřeno spektrometrem JETI specbos 1211UV	37
Obrázek 32: Vývoj odebíraného příkonu světelnými zdroji v čase, změřeno programovatelným napájecím zdrojem APT 300XAC	37
Obrázek 33: Průběh teplot v měřených bodech jednotlivých světelných zdrojů při teplotě okolí $\vartheta_o = 24\text{ °C}$, změřeno měřicí ústřednou ALMEMO 5690-2	38
Obrázek 34: Průběh teplot v měřených bodech světelných zdrojů 3.1 a 5 při teplotách okolí $\vartheta_o = -15, 50, 60, 70, 80, 120\text{ °C}$, změřeno měřicí ústřednou ALMEMO 5690-2	39
Obrázek 35: Průběh teplot v měřených bodech světelných zdrojů 1 a 2 při teplotách okolí $\vartheta_o = -15, 50, 60, 70, 80, 120\text{ °C}$, změřeno měřicí ústřednou ALMEMO 5690-2	40
Obrázek 36: Průběh teplot v měřených bodech světelných zdrojů 6.1 a 4 při teplotách okolí $\vartheta_o = -15, 50, 60, 70, 80, 120\text{ °C}$, změřeno měřicí ústřednou ALMEMO 5690-2	40
Obrázek 37: Křížové charakteristiky zdroje 1 změřené spektrometrem JETI specbos 1211UV a programovatelným napájecím zdrojem APT 300XAC	41
Obrázek 38: Křížové charakteristiky zdroje 2 změřené spektrometrem JETI specbos 1211UV a programovatelným napájecím zdrojem APT 300XAC	42

Obrázek 39: Křížové charakteristiky zdroje 3.1 změřené spektrometrem JETI specbos 1211UV a programovatelným napájecím zdrojem APT 300XAC.....	42
Obrázek 40: Křížové charakteristiky zdroje 5 změřené spektrometrem JETI specbos 1211UV a programovatelným napájecím zdrojem APT 300XAC.....	43
Obrázek 41: Křížové charakteristiky zdroje 6.1 změřené spektrometrem JETI specbos 1211UV a programovatelným napájecím zdrojem APT 300XAC.....	43
Obrázek 42: Křížové charakteristiky zdroje 7 změřené spektrometrem JETI specbos 1211UV a programovatelným napájecím zdrojem APT 300XAC.....	44
Obrázek 43: Hodnocení měřených světelných zdrojů z pohledu indexu barevného podání a měrného světelného výkonu se zohledněním ustálení parametrů po připojení k napájení.	45
Obrázek 44: Srovnání měrných světelných výkonů měřených světelných zdrojů..	46
Obrázek 45: Srovnání teploty chromatičnosti měřených světelných zdrojů.....	46

Seznam tabulek

Tabulka 1: Materiály pro výrobu různých barev LED [13]	11
Tabulka 2: Přehled změřených parametrů světelných zdrojů	28
Tabulka 3: Vybrané změřené a deklarované parametry pro zdroje 1, 2, 3.1 a 3.2 ..	47
Tabulka 4: Vybrané změřené a deklarované parametry pro zdroje 4, 5, 6.1 a 7.....	47
Tabulka 5: Seznam měřicích přístrojů včetně specifikace	48

ÚVOD

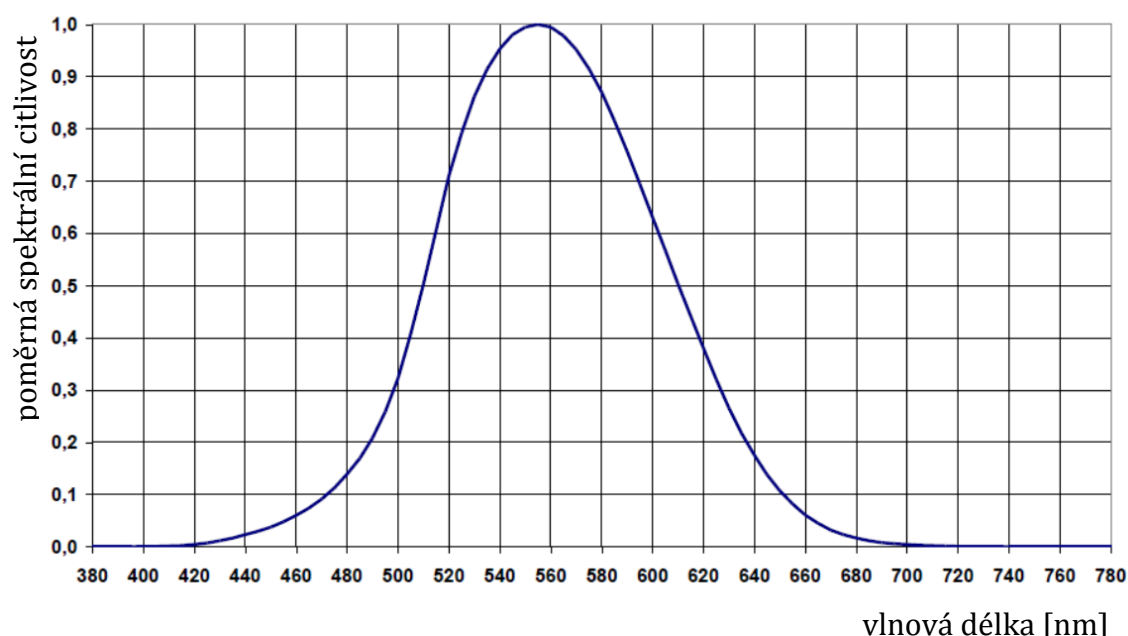
Umělé světlo patří ke společnosti už velmi dlouho. Dnes je často skloňována čtvrtá průmyslová revoluce a právě světlo a významný rozvoj osvětlovací techniky šel ruku v ruce s druhou průmyslovou revolucí – objevem a následným využitím elektrického proudu. Zvláště po vynalezení a využití žárovky se prosadila elektrifikace a osvětlování obydlí mělo největší podíl na spotřebě elektrické energie domácnostmi. Lidé si umělým osvětlením prodloužili den a mohli tak pracovat i v době, kdy bylo přirozeného slunečního světla málo nebo v noci. Postupně se v osvětlování v lidské společnosti prostrídaly různé typy světelných zdrojů, které pracují na různých principech přeměny elektrické energie na světelnou.

Odvětví světelné techniky zabývající se LED světelnými zdroji prochází v posledních letech velmi dynamickým rozvojem a snižováním ceny. Od vynálezu světelné diody, která svítila jen velmi málo, pokročil vývoj až k dnešním světelným zdrojům, které na LED principu pracují a kterými si lidé osvětlují svá obydlí, firmy průmyslové haly. Stejně jako ostatní světelné zdroje i LED světelné zdroje mají svá specifika, s kterými je nutné při použití, při návrhu osvětlovacích soustav, při náhradě jiných světelných zdrojů ve starších svítidlech počítat. I když je světelná dioda na světě nedlouho, byla to dlouhá cesta až k současným LED retrofitům, LED modulům či jiným tvarům a typům LED světelných zdrojů, nebylo jednoduché přijít na technologii, která by se dala používat k osvětlování. Dvěmi nejvýznamnějšími mezníky ve vývoji LED byl objev modré LED a následně objev bílé LED. Potom už se začal zvyšovat měrný světelný výkon a zvyšuje se stále.

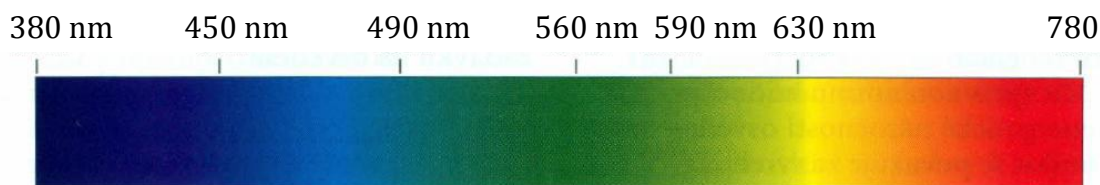
Díky své vysoké světelné účinnosti, nízké spotřebě, ekologickému provozu a rozmanitosti provedení se v poslední době LED technologie uplatňují jak v moderních interiérech, tak i v klasických svítidlech, kde mnohdy stačí vyměnit jen světelný zdroj. Rozměry, nenáročnost provozu a dlouhá životnost umožňuje architektům a designérům pracovat s tímto typem světelného zdroje tak, jako nikdy předtím. LED zdroje světla mohou sloužit jako hlavní osvětlovací prvek v místnosti a stejně tak jako doplňující prvek vytvářející určitou světelnou scénérii. Taktéž nacházejí uplatnění v průmyslu ať už jako náhrada zářivkových trubíc, nebo také halogenových svítidel. V oblasti pouličního osvětlení mají díky přesnému určení osvětlované plochy vliv nejen na spotřebu, ale také na omezení světelného smogu.

1 SVĚTLO

Světlo je elektromagnetické záření vyzařované v rozmezí vlnových délek 380 – 780 nm. Barevné rozložení tonů znázorňuje obr. 2. Lidské oko má v tomto rozsahu určitou spektrální citlivost na jednotlivé vlnové délky popsanou dle CIE křivkou $V(\lambda)$, znázorněnou na obr. 1. Mezi základní veličiny pak patří zejména světelný tok Φ (lm), svítivost I (cd), osvětlenost E (lx), jas L ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$) a světlení M ($\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}$). S těmito základními veličinami se provádějí výpočty osvětlovacích soustav zejména z hlediska stanovení množství světla potřebného pro správné vidění a zrakovou pohodu [2].



Obrázek 1: Spektrální citlivost normálního fotometrického pozorovatele dle CIE 1931 [1]



Obrázek 2: Rozložení barevných tónů ve spektru [2]

1.1 Vznik světla

Viditelná složka elektromagnetického záření – světlo může vznikat několika způsoby. Rozlišujeme tři typy vzniku světla:

- teplotní záření vyvolané vysokou teplotou emitujícího povrchu v souladu s Planckovým zákonem,
- záření elektrického výboje v parách kovů a plynech,
- luminiscence pevných látek.

Na základě těchto principů pracují v podstatě všechny dnes vyráběné světelné zdroje. Podle původu světelného záření můžeme hovořit také o přírodních zdrojích (Slunce, blesk, Měsíc) a umělých zdrojích světla (např. žárovka, výbojka, svítivá dioda, ale také svíčka, plynová lampa apod.). Zdroje, kde světelné záření přímo vzniká přeměnou energie, se nazývají primární zdroje, kde světlo je vyzařováno prostřednictvím odrazu od povrchu se nazývají sekundární neboli druhotné [2].

1.2 Barevné vlastnosti světla

Základní pojmy

Barva je část zrakového vjemu, která bez ohledu na intenzitu podnětů umožňuje rozlišit dva prostorově sousedící vjemy. Je to kvalitativní složka zrakového vjemu.

Kolorita popisuje barevné vlastnosti povrchů těles, určuje barevný vjem určitého povrchu nebo světlo propouštějící materiál při osvětlení jedním z normalizovaných světél. Kolorita předmětu závisí na spektrálních vlastnostech činitele odrazu nebo prostupu materiálu.

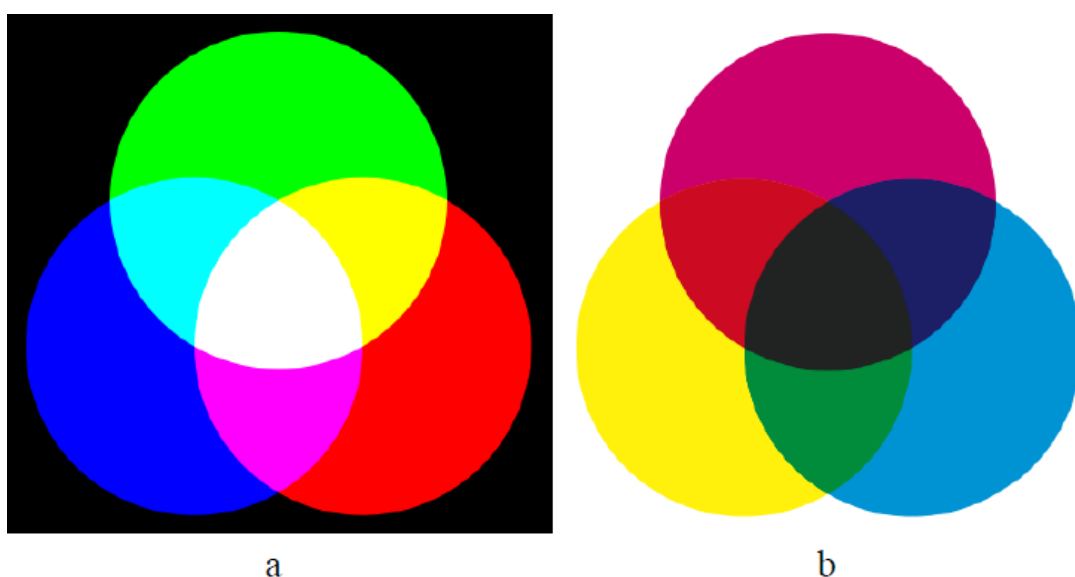
Chromatičnost naopak popisuje barevné vlastnosti světla určitého (primárního) světleného zdroje. Chromatičnost je dána pouze spektrálním složením daného světla [1].

Míchání barev

Několik barevných podnětů se může mísit a vytvářet tak výsledný barevný vjem. Po smísení již nelze zpětně určit, z jakých komponent podnět vzniknul. Při úvaze spektra jako směsi všech dostupných monochromatických světél, pak každé světlo je výsledkem mísení těchto dílčích barevných podnětů. Po dopadu na sítnici oka dochází dále k redukci spektrální informace, protože lidský zrak obsahuje pouze tři typy barevných čípků, které rozlišují vjemy dlouhých, středních a krátkých vlnových délek světla jako integrální působení dopadajícího spektra. Na sítnici tedy dochází

k rozdělení barevné informace na tři základní podněty, které jsou zdrojem pro vnímání barev.

Spojení více barevných podnětů do jediného prostým sečtením jednotlivých podnětů se nazývá aditivní míchání barev. Vedle aditivního způsobu míchání barev existuje subtraktivní míchání, které vychází z opačného principu, kdy výsledný barevný vjem vzniká z původního světelného podnětu odečtením určitých spektrálních částí. Oba způsoby jsou znázorněné na obr. 3. Subtraktivní míchání barev se používá u tiskových zařízeních, kde např. smíšením inkoustů s různým činitelem odrazu vznikají po osvětlení papíru různé odražené složky vzniklé odrazem od dané směsi pigmentů [1].



Obrázek 3: Ukázka aditivního (a) a subtraktivního (b) míchání barev[3]

Index podání barev

Index podání barev určuje odchylku barevného vnímání referenčních barevných vzorků osvětlených zkoumaným zdrojem světla, u kterého je index podání barev určován, a referenčním zdrojem světla, který je považován za normál. Jednotlivé barevné vzorky jsou osvětleny referenčním a měřeným světlem a jsou změřeny souřadnice odražené barvy světla v souřadném systému UVW, tedy v rovnoměrném kolorimetrickém prostoru. Druhou možností je přímé měření pomocí referenčních vzorků osvětlovaných referenčním a srovnávacím světlem. I tato metoda je však velice komplikovaná a vyžaduje specializované laboratorní vybavení [1].

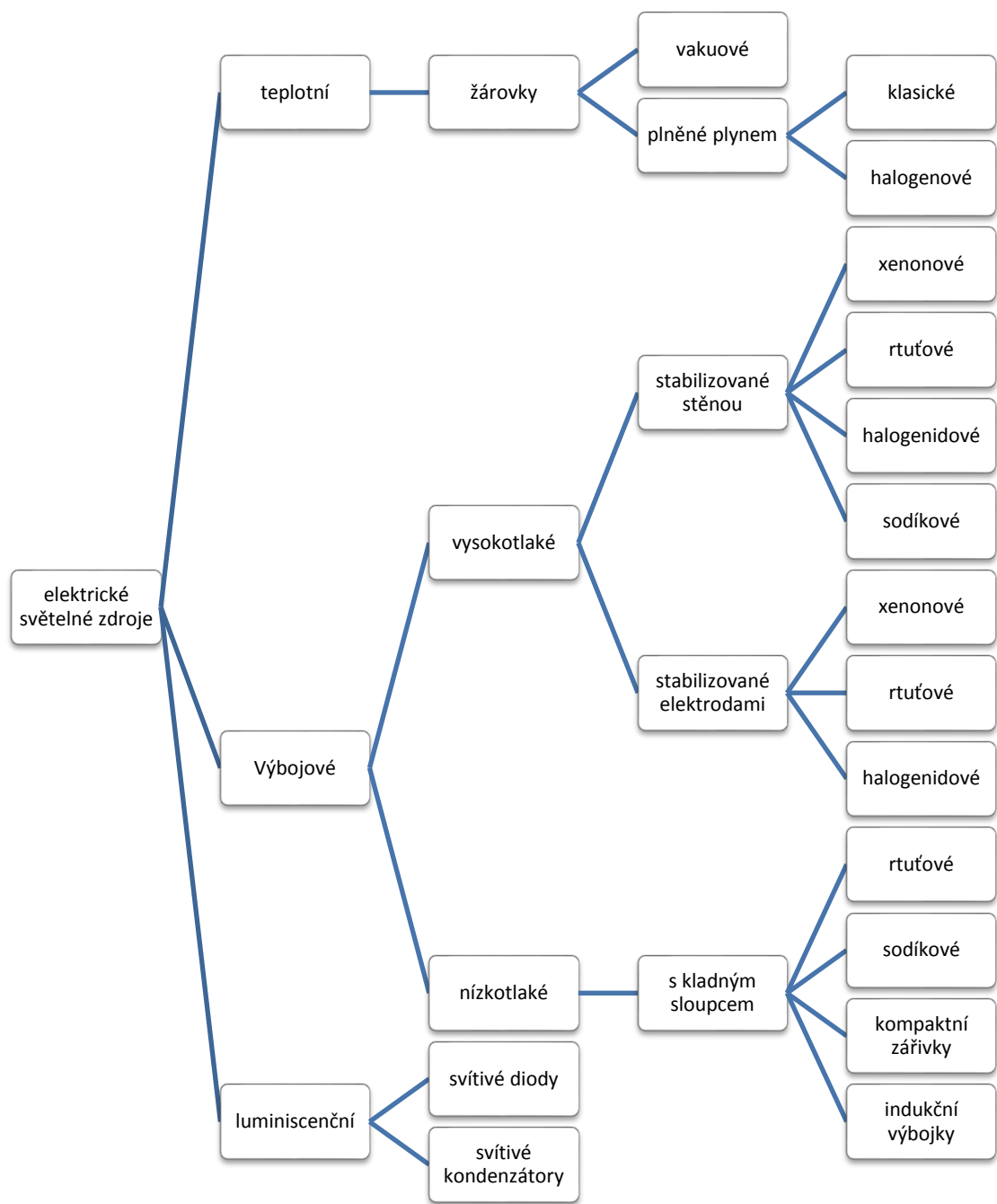
Teplota chromatičnosti

Teplota chromatičnosti T ovlivňuje vnímání prostoru z hlediska zrakové pohody. Vychází z fyziologických aspektů zrakového vnímání, které respektují změnu teploty chromatičnosti světla během denního cyklu. Večerní soumrak má výrazně nižší teplotu než ranní rozbřesk. Vnitřní osvětlení by proto mělo respektovat tyto fyziologicky nastavené skutečnosti. Teplotu chromatičnosti lze určit výpočtem nebo měřením. Teplotu chromatičnosti lze získat rovněž z katalogu a datových listů výrobců světelných zdrojů. Norma ČSN EN 12646-1 určuje pro některé prostory teploty chromatičnosti. Pro ostatní prostory by měla být hodnota určena podle účelu prostorů kvalifikovaným odhadem [1].

1.3 Základní dělení světelných zdrojů

Elektrické zdroje světla se dělí do tří základních kategorií a to na zdroje teplotní, výbojové a luminiscenční. Celou hierarchii dělení světelných zdrojů znázorňuje obr. 4. Nejnižší účinnost mají teplotní zdroje světla, do kterých spadají klasické i halogenové žárovky, ve kterých vzniká světlo rozžhavením wolframového vlákna na teplotu 2500 °C. Baňka žárovky je v případě klasické žárovky plněná inertním plynem, zpravidla směsí argonu s dusíkem, u speciálních kryptonem nebo xenonem. V případě halogenových žárovek jsou do směsi náplně baňky přidány halogenidy. Vyšší účinnost mají výbojové světelné zdroje, které pracují na principu hoření elektrického oblouku mezi dvěma elektrodami v hořáku, což je baňka, plněná plyny nebo parami kovů. Výbojky mohou být buď vysokotlaké, nebo nízkotlaké. Spektrum emitovaného záření a účinnost jednotlivých zdrojů je závislá na plynu, kterým je plněná výbojka nebo na luminoforu, který vlnové délky emitovaného záření transformuje. Mezi nejpoužívanější vysokotlaké výbojky se řadí hlavně rtuťové, xenonové a sodíkové výbojky například pro pouliční osvětlení. V případě nízkotlakých výbojek má největší zastoupení rtuťová výbojka a to jak v provedení lineární zářivkové trubice, tak v provedení kompaktní zářivky.

Mezi zdroje s největší účinností se řadí LED světelné zdroje, které pracují na principu elektroluminiscence při rekombinaci nosičů nábojů při průchodu PN přechodem v propustném směru. LED světelné zdroje v současné době existují ve velkém množství variant.



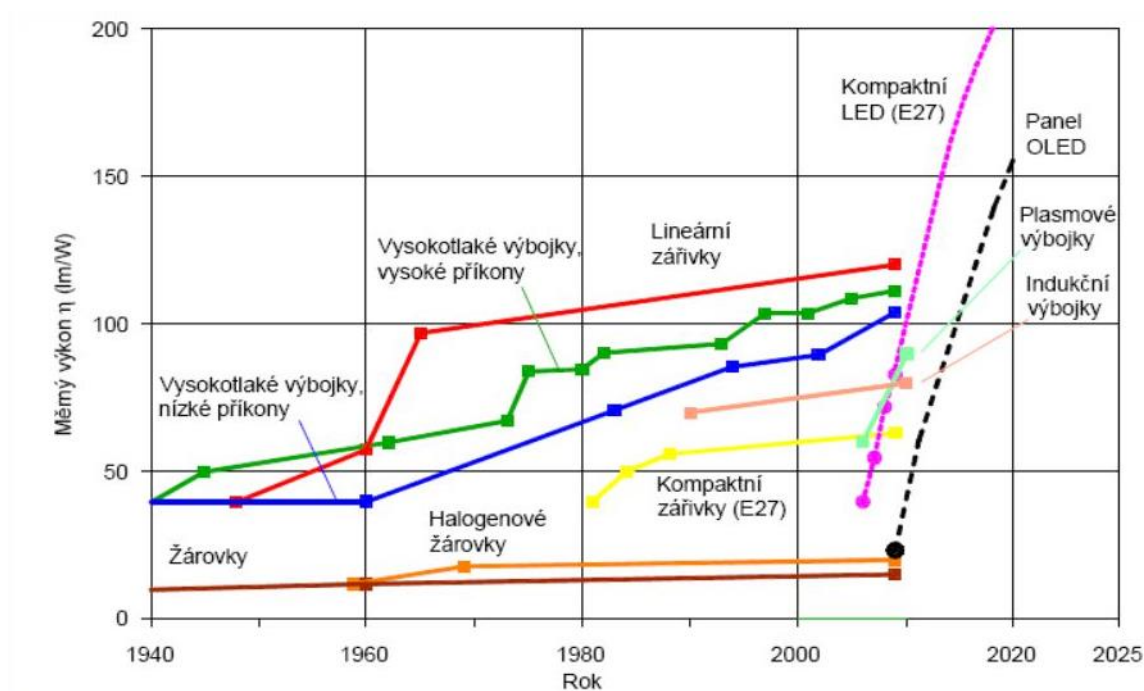
Obrázek 4: Základní dělení světelných zdrojů [2]

2 LED SVĚTELNÉ ZDROJE

První zmínka o principu elektroluminiscence, na kterém LED pracuje, pochází z Anglie, kde Henry Joseph Round v roce 1907 tento princip objevil. Po objevení tranzistoru v roce 1951 a pokroku ve vývoji fyziky polovodičů nastal další zásadní pokrok.

První LED – červená – spatřila světlo světa v roce 1962 v USA a spustila se průmyslová výroba svítivých diod, které jsou prakticky použitelné a emitují záření ve viditelné oblasti elektromagnetického spektra. Byly využívány převážně na signalizaci a také na stabilizaci napětí podobně jako dnes Zenerovy diody. Postupným zkoumáním vznikly v roce 1971 další barvy LED (zelená, oranžová, žlutá) a zvedá se výkonnost a účinnost LED.

Další zásadní zlom pro LED jako pro světelný zdroj nastal v roce 1993. V Japonsku byla objevena modrá LED, později v roce 1995 i bílá LED, která tvoří základ všech dnes používaných LED světelných zdrojů. Cílem výzkumu v dnešní době je dosáhnout co možná nejvyššího měrného světelného výkonu. Vývoj měrného světelného výkonu u různých světelných zdrojů je vidět na obr. 5 [4].



Obrázek 5: Vývoj měrného světelného výkonu světelných zdrojů [6]

2.1 Polovodiče

Za polovodič se považují materiály, které jsou za určitých podmínek vodiči a za určitých se řadí mezi izolanty. V případě, že elektrický proud vedou, tak úplně odlišným způsobem než kovy. Nejčastěji používané polovodičové materiály jsou křemík (Si) a germanium (Ge), což jsou prvky ze čtvrté skupiny periodické soustavy a mají tedy ve vnější slupce elektronového obalu čtyři valenční elektrony. V současné době se pro výrobu většiny polovodičových součástek používá křemík z důvodu většího teplotního rozsahu, typicky až do 150 °C [10].

Vlastní polovodič

Vlastní polovodič (intrinsický) neobsahuje téměř žádné poruchy v krystalové mřížce a příměsi. Protože nelze vyrobit dokonale čistý polovodič, jedná se v praxi o polovodič s čistotou 99,9999 %. Ve vlastním polovodiči je stejná koncentrace elektronů a děr, protože vznik volného elektronu je podmíněn vznikem prázdného místa v kovalentní vazbě a to díry. Elektron se dodáním energie uvolní ve valenčním pásu a přesune se do vodivostního, kde se volně pohybuje v prostoru krystalické mřížky, ve valenčním pásu po něm zbyde díra. Díra má stejně velký náboj jako elektron, pouze je opačné polarity. Touto volnou díru může zaplnit volný elektron, po kterém zbyde díra na jiném místě – tento proces se nazývá rekombinace.

Vlastnosti vlastního polovodiče jsou velmi závislé na teplotě, při nízkých teplotách se vlastní polovodič chová jako izolant [10] [11].

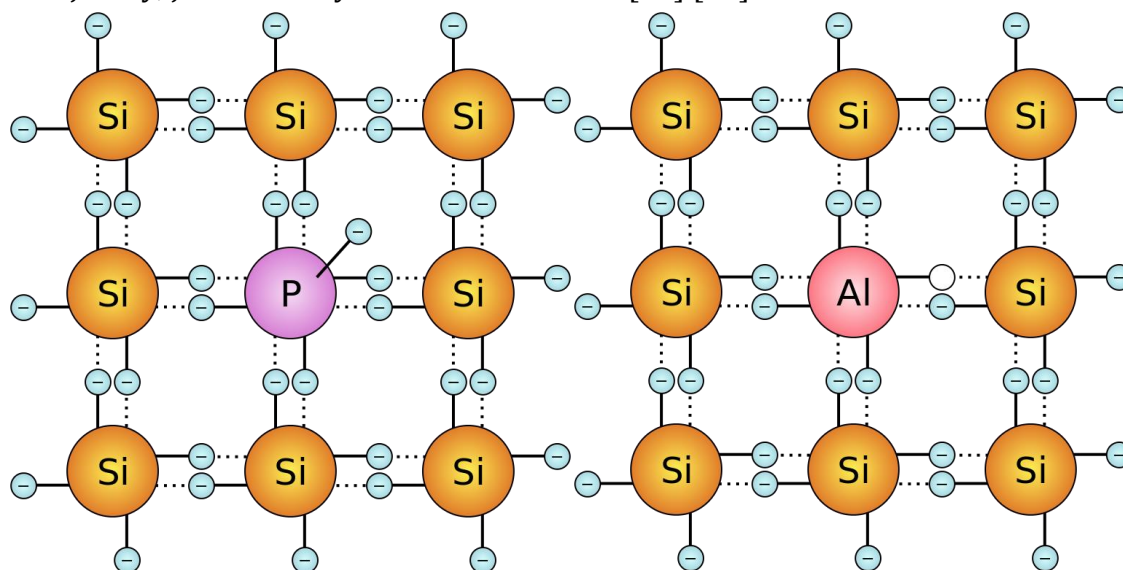
Nevlastní polovodiče typu N a P

Koncentraci elektronů a děr v polovodiči lze výrazně zvýšit přidáním příměsí v podobě atomů do základního materiálu polovodiče. Pro výraznou změnu vlastností polovodiče stačí velmi malé množství příměsí. Existují dvě varianty příměsí – donory a akceptory, atomové mřížky obou variant jsou znázorněny na obr. 6.

Pro vznik nevlastního polovodiče typu N je nutné do základního substrátu čtyřmocného prvku zavést prvek pětímocný, tj. s jedním valenčním elektronem navíc, tento se nazývá donor (dárce). V případě křemíku se jako donory používají prvky z páté skupiny periodické soustavy, nejčastěji fosfor (P) nebo arsen (As). Koncentrace donorů se pohybuje zpravidla v rozmezí $10^{14} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. V polovodiči typu N jsou většinovými (majoritními) nosiči náboje elektrony, menšinovými (minoritními) potom díry, vzniká elektronová vodivost.

Pro vznik nevlastního polovodiče typu P se do základního substrátu čtyřmocného prvku zavádí prvek ze třetí skupiny periodické soustavy s třemi valenčními elektrony - akceptor. V případě křemíkového substrátu se používá bór (B). Koncentrace akceptorů v polovodiči typu P nabývá řádově stejných hodnot, jako

koncentrace donorů v polovodiči typu N. V polovodiči typu P jsou majoritními nosiči náboje díry, jedná se tedy o děrovou vodivost [10] [11].



Obrázek 6: Znárodnění atomové mřížky polovodiče typu N a typu P [9]

PN přechod

Při spojení nevlastního polovodiče typu P a typu N vzniká PN přechod, který jako homogenní přechod je základním stavebním prvkem polovodičových součástek (dioda, tranzistor). Homogenní PN přechod se vytváří z polovodiče stejného chemického složení, například n-Si/p-Si. V rovnovážném stavu bez přiloženého vnějšího napětí difundují elektrony z oblasti N do oblasti P, díry z oblasti P do oblasti N. V oblasti přechodu se elektrony a díry setkávají a rekombinují. Na straně N vzniká kladný prostorový náboj, v oblasti P záporný prostorový náboj. V oblasti přechodu vytvářejí elektrické pole, přechod je ve stavu dynamické rovnováhy. Mezi neutrálními oblastmi polovodiče typu N a typu P vzniká kontaktní rozdíl potenciálů, který se nazývá difuzní napětí [10] [11].

2.2 Elektroluminiscence

Elektroluminiscence je základní vlastnost, na které je založena činnost nejen luminiscenčních, ale i laserových diod. Elektroluminiscence nastává při rekombinaci nosičů nábojů při proudu, tekoucím v propustném směru. Elektrony vybuzené do vodivostního pásu mají přebytek energie, tato energie se musí uvolnit – jedna z možností uvolnění je ve formě fotonu, jehož energie se rovná šířce zakázaného pásu – zářivá rekombinace. Počet vyzářených fotonů stoupá s rostoucí šířkou zakázaného pásu, vše ale záleží na struktuře přechodu. Typická struktura polovodiče pro zářivou rekombinaci je například GaAs nebo InP [12].

Elektroluminiscenční dioda

LED je zdroj elektromagnetického záření, který pro svou funkci využívá emisi při rekombinaci nosičů na PN přechodu. Elektroluminiscenční diody se používají pro vlnové délky v rozsahu 350 nm – 1300 nm. Pro přesné definování vlnové délky nebo malého rozsahu vlnových délek musí být přesně definována šířka zakázaného pásu. Toho lze dosáhnout novými materiály na bázi fosfidů india, galia a hliníku (InP, GaP, AlP), materiály pro jednotlivé barvy jsou uvedeny v tab. 1. Napětí v propustném směru se u jednotlivých LED liší podle použitého materiálu, struktura elektroluminiscenční diody je znázorněná na obr. 7.

Velikost čipu je několik mm². Záření, vycházející z čipu je často potřeba usměrnit optickými prvky. Dalším vývojem se na jeden čip začalo umisťovat více přechodů, často v maticovém uspořádání, tím se dosáhlo mnohonásobně vyššího měrného světelného výkonu daného LED modulu. Moderní polovodičové materiály používané v současné době hlavními výrobci se skládají z velmi složitých kombinací epitaxně vypěstovaných vrstev. Dokonalejší a velmi náročné technologické postupy zajišťující vysokou čistotu výsledného produktu, zvýšily účinnost LED, zlepšily jejich odolnost proti působení vyšší teploty a vlhkosti. Dále umožnily zvýšit flexibilitu výrobního procesu, takže žluté, červené a oranžové LED lze vyrábět stejnou technologií a výslednou barvu řídit pouze úpravou velikosti zakázaného pásu. Typická spektra vybraných barevných LED jsou uvedena na obr. 8. Vyzařovaná vlnová délka je vyjádřena vztahem (3.1)[8].

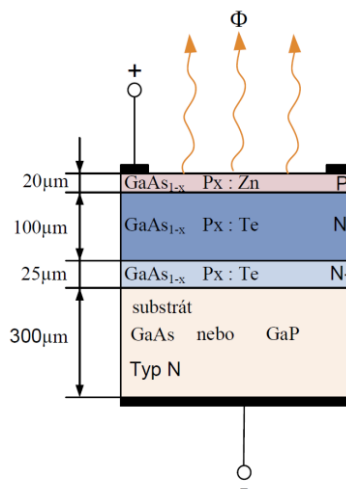
$$\lambda = \frac{hc}{E_g}, \quad (3.1)$$

kde

E_g – energetická pásmová bariéra mezi vodivostním a valenčním pásem,

h – Planckova konstanta $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

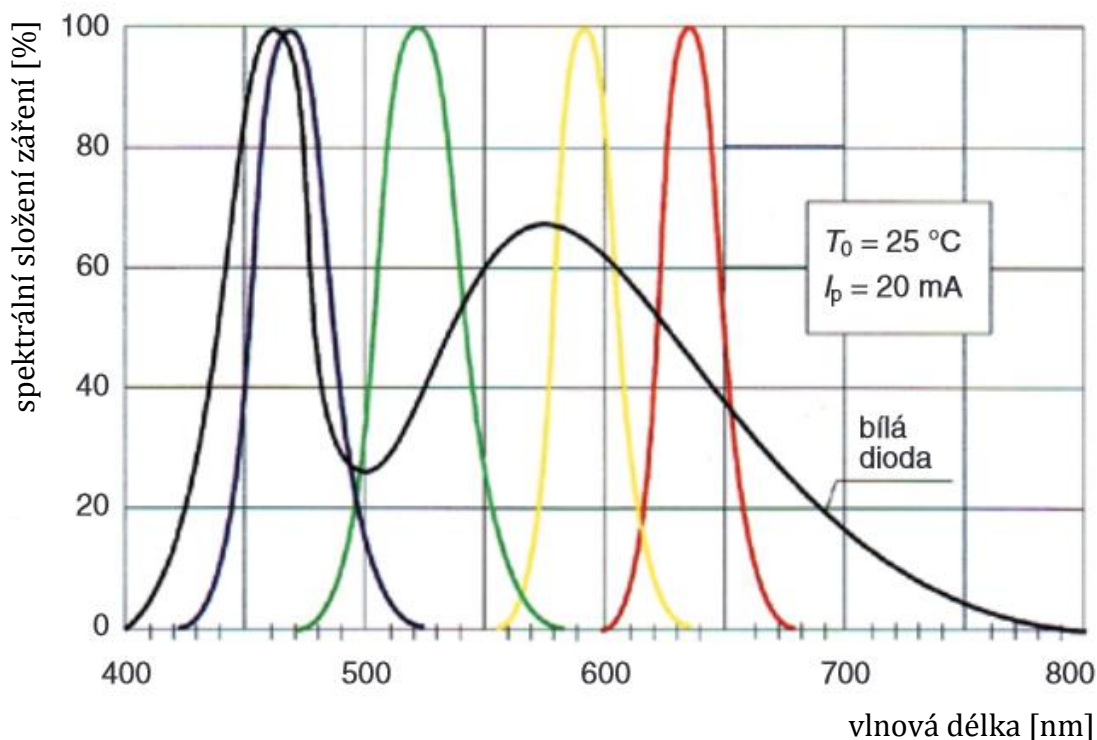
c – rychlost světla ve vakuu $299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



Obrázek 7: Struktura elektroluminiscenční diody [12]

Tabulka 1: Materiály pro výrobu různých barev LED [13]

Barva	Vlnová délka (nm)	Úbytek napětí (V)	Materiál
IR	> 760	1,6	GaAs; $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As})$
červená	610 – 760	1,8 – 2,1	AlGaAs ; $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$; GaP
oranžová	590 – 610	2,2	$\text{Ga}_x\text{As}_{1-x}\text{P}$; $(\text{AlGaIn})\text{P}$; GaP
žlutá	570 – 590	2,4	GaAsP; AlGaInP ; GaP
zelená	500 – 570	2,6	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$; GaN; GaP; $(\text{AlGaIn})\text{P}$
modrá	450 – 500	3,0 – 3,5	ZnSe; $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$; SiC
fialová	400 – 450	3,0 – 3,5	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$
UV	< 400	3,5	BN, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$; AlN



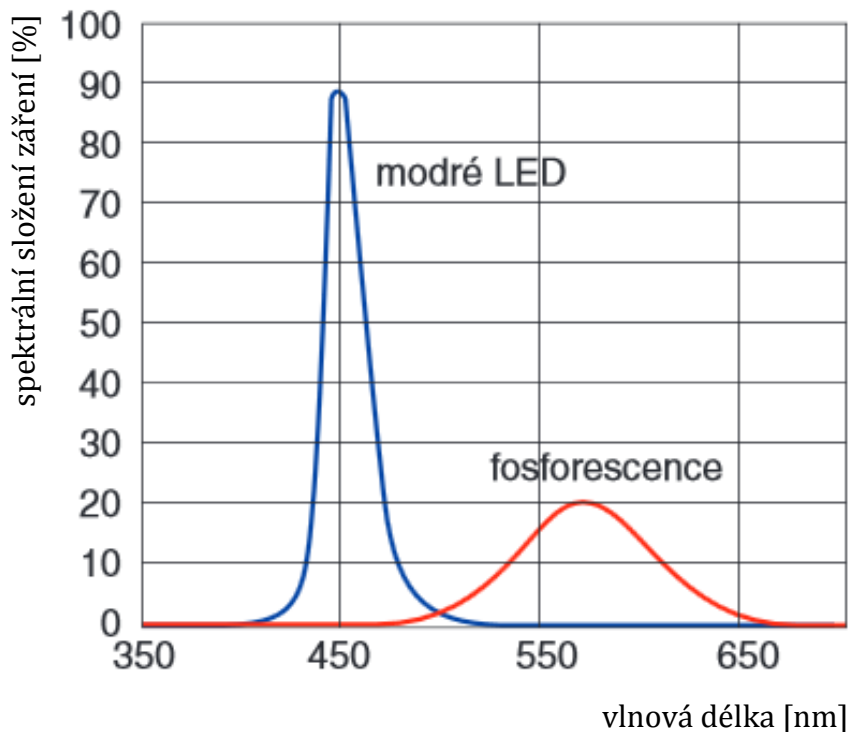
Obrázek 8: Emisní spektrum vybraných barevných LED [8]

2.3 Způsoby výroby bílé LED

Úvodem je potřeba uvést, že neexistuje bílá LED, která by emitovala bílé světlo přímo z PN přechodu vlivem vhodných chemických příměsí. Světlo bílé LED je vždy výsledkem úpravy jiných barev, případně vlnových délek.

Jsou rozlišovány dva způsoby konstrukce bílé LED. Nejstarším z nich funguje na principu aditivního míchání tří základních barev. V jednom pouzdře jsou umístěny tři LED a to červené, modré a zelené barvy. Nevýhodou tohoto principu je prosvítání jednotlivých barevných složek na okraji světelného kužele, který tato bílá LED vyzařuje. Jednotlivé světelné kužely dílčích barev se sice maximálně překrývají, ale ne zcela a právě tento problém způsobuje zmíněné rušivé prosvítání jednotlivých barev.

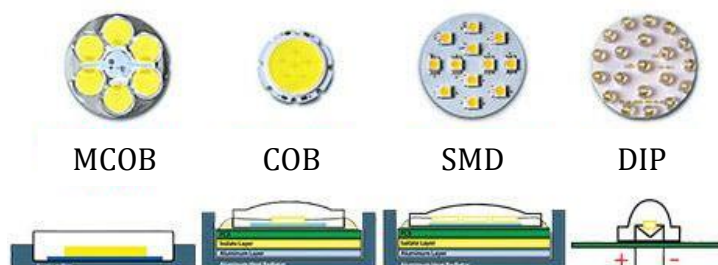
Další princip je založen na principu fluorescence luminoforů v kombinaci s modrou, nebo UV LED. Modré světlo vycházející z PN přechodu je upravováno luminoforem, což je látka, která je schopna měnit vlnovou délku elektromagnetického záření. Vhodným luminoforem je yttrito-hlinitý granát aktivovaný cerem (Y3Al5O12:Ce), který je buzen světlem modré diody InGaN (výsledné spektrum je na obr. 9). Část záření v modré oblasti spektra je luminoforem propuštěna a část je transformována do červené oblasti spektra, tzv. fosforescence. Poměrem množství energie v těchto dvou oblastech je ovlivňována výsledná teplota chromatičnosti svítivé diody. Tento princip se používá nejčastěji, je tak oproti předchozímu energeticky úspornější. Při použití UV LED jako základního konstrukčního prvku je luminoforem na příslušné složky spektra záření transformováno UV záření.



Obrázek 9: Emisní spektrum bílé LED (luminofor buzený bílou LED) [8]

2.4 Typy používaných pouzder LED

Historickým vývojem vznikalo několik typů pouzder pro svítivé diody. Na vývoji je patrné přizpůsobování pouzdra, jak je vidět na obr. 10, hlavně zvyšování výkonnosti LED a zlepšování odvodu zbytkového tepla, jeho předávání chladiči nebo okolí.

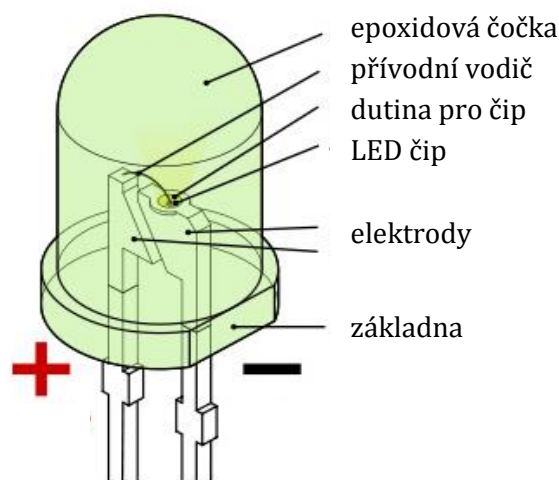


Obrázek 10: Srovnání typů LED pouzder [14]

DIP LED

DIP (Dual in-line package) je u LED historicky nejstarším pouzdrem, jedná se o PN přechod na substrátu, umístěný na robustních kovových ploškách, které přecházejí ve vývody součástky. Ploška včetně substrátu je zalita do plastu, u LED pro osvětlovací účely zpravidla čirého, který tvoří současně čočku v optické dráze světla, které vychází z přechodu. Konstrukci DIP LED znázorňuje obr. 11.

Pouzdro DIP LED je určeno pro pájení do desek plošných spojů. Konstrukčně je velmi odolné proti mechanickému poškození, přechod samotný je chráněn i proti vlhkosti. Protože jedinou tepelně vodivou částí součástky, která by mohla od PN přechodu odvádět teplo jsou samotné vývody, nelze od tohoto typu LED očekávat velký výkon, protože by nebylo možné dosáhnout dostatečného chlazení. V současné době už je tento typ LED pro osvětlovací účely překonán a používá se už jen například pro informační signalizační účely nebo ve velkoplošných obrazovkách. Měrný světelný výkon se u tohoto typu pohybuje podle konkrétního typu v rozmezí 35 – 80 lm/W [15].

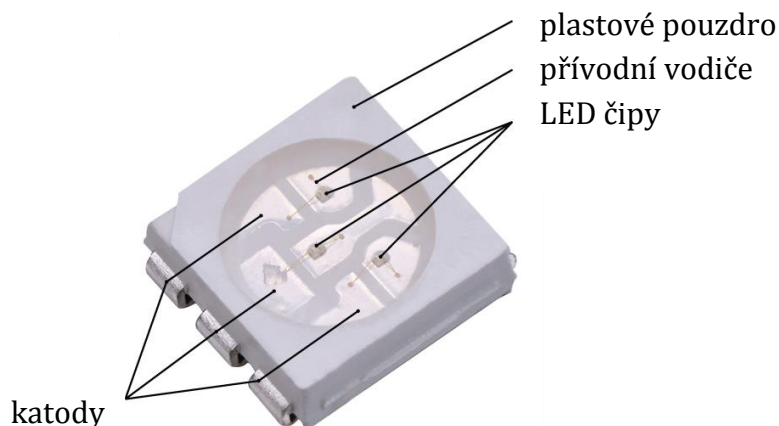


Obrázek 11: Popis DIP LED [15, přeloženo]

SMD LED

SMD (Surface mounted device) je upravená verze DIP led pro povrchovou montáž. Substrát s PN přechodem je opět zalitý v plastu, jak je vidět na obr. 12. Průhledná je jen část pouzdra a navíc může být mezi plošným spojem a samotným PN přechodem LED daleko tenčí vrstva plastu, což částečně zlepšuje prostup tepla a jeho předávání plošnému spoji.

Stejně jako v předchozím případě lze považovat za nevýhodu, že je nutno tyto LED pájet na desku plošných spojů, která má většinou špatné parametry z hlediska tepelné vodivosti a neumožňuje dokonalý odvod tepla od PN přechodu. Tyto SMD LED měly vyšší světelný tok, než předchozí model SMD LED, používaly se v prvních náhradách konvenčních světelných zdrojů. I přes stejné rozměry PN přechodu jako u předchozího modelu se celkové rozměry vlastní součástky výrazně zmenšily. Řádově se výkon těchto LED pohybuje v jednotkách wattů. Tento typ LED se používá například v LED páscích. Měrný světelný výkon η se u tohoto typu pohybuje podle konkrétního typu v rozmezí 50 – 100 lm/W [15].

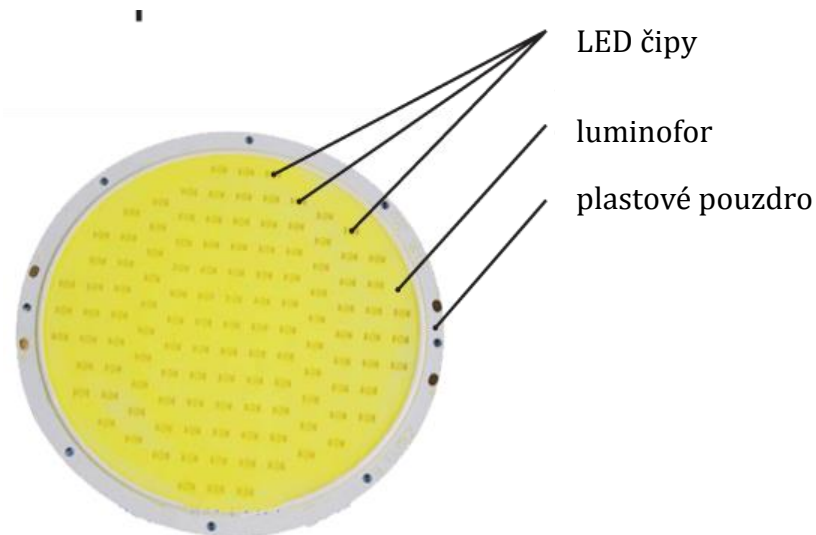


Obrázek 12: Popis pouzdra RGB SMD LED [15, přeloženo]

COB LED

COB (Chip on board) je technologie výroby, při které je více LED čipů uloženo v jednom pouzdru a tvoří tak jeden modul. Nanášené polovodičové vrstvy jsou tenčí než u SMD LED. Nejen že se oproti předchozí verze SMD LED zvyšuje světelný výkon, ale hlavně se snižuje tepelný odpor cesty tepla mezi samotnými PN přechody a chladičem. Často se COB LED dodávají přímo připevněné na hliníkovou základnu z důvodu lepšího odvodu tepla, tento komplet lze potom snadno připevnit na chladič. Zlepšení odvodu tepla a chlazení má přímý vliv na výrazné prodloužení životnosti modulu. Při požadavku na výkonný světelný zdroj muselo být v případě použití SMD LED více jednotlivých LED, které měly v součtu požadovaný světelný tok. V případě COB LED je možné použít pouze jeden modul, jednotlivé PN přechody jsou integrovány na jednom čipu. Řádově se výkon těchto LED pohybuje

v jednotkách wattů. Ukázka COB LED je vidět na obr. 13 Měrný světelný výkon η se u tohoto typu pohybuje podle konkrétního typu v rozmezí od 80 přes 100 lm/W [15] [17].



Obrázek 13: Popis pouzdra COB LED [15, přeloženo]

MCOB LED

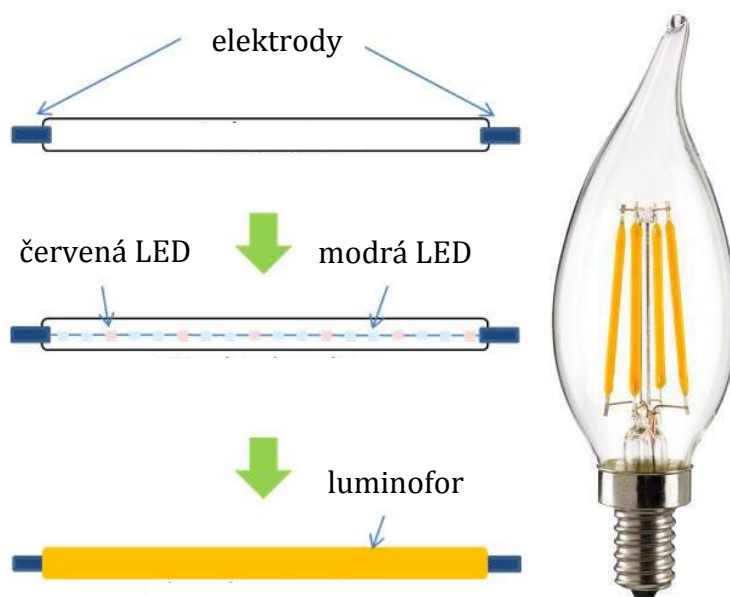
MCOB (Multiple chip on board) se vyvinuly z COB LED, jedná se o velmi podobné technické řešení. MCOB LED se skládá z jednotlivých PN přechodů, rozmístěných v ploše v předem daném uspořádání, zpravidla v matici. Přínosem této technologie je několikanásobné zvýšení světelného toku. Světelný tok dílčích PN přechodů je sice malý, při velkém množství těchto přechodů dosahují tyto LED v současné době jedny z nejlepších parametrů. Řádově se výkon u MCOB LED pohybuje až v desítkách wattů. Ukázky různých typů MCOB LED jsou vidět na obr. 14. Tento typ LED se nejvíce používá v LED reflektorech, postupně i v LED retrofitech.



Obrázek 14: Popis a příklady pouzder MCOB LED [15, přeloženo]

Filament LED

Tento typ pouzdra patří k nejnovějším, jedním z jeho úkolů je imitovat ve skleněné baňce vlákno klasické žárovky. LED tvoří úzký dlouhý pásek substrátu, na který je umístěno v sérii několik PN přechodů, povrch pásku je obalen luminoforem, jak je vidět na obr. 15. Celý LED retrofit tvoří sériová případně sérioparalelní kombinace zpravidla čtyř nebo šesti jednotlivých filamentů. Tento typ LED retrofitu není až tak směrový, jako při použití předchozích typů LED. Největším problémem je v tomto případě chlazení. Odvod tepla od samotných PN přechodů je buď vedením přes substrát a přívody, nebo prostřednictvím plynu, kterým je LED retrofit plněna. Plyn uvnitř baňky, zpravidla helium, odvádí teplo od jednotlivých pouzder k baňce a ta předává teplo do okolního prostředí. Současný výzkum se zabývá vývojem plynu s co největší tepelnou vodivostí, aby jím mohla být baňka plněna a mohlo tak být chlazení co nejefektivnější. Řádově se výkon těchto LED pohybuje v jednotkách wattů [18].

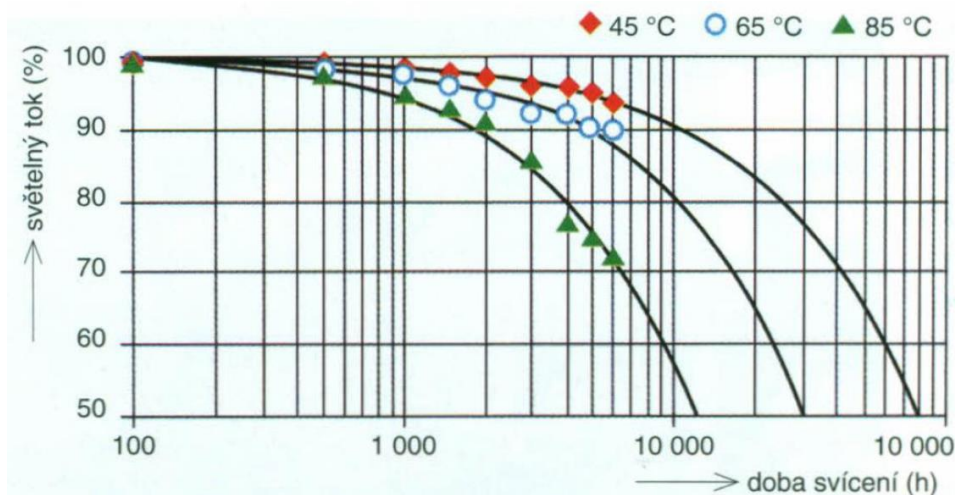


Obrázek 15: Popis jednotlivých vrstev pouzdra Filament LED a finální produkt [16, přeloženo] [20]

2.5 Chlazení LED zdrojů

Protože přeměna elektrické energie ve světelnou není dokonalá, dochází i u LED světelných zdrojů k jejich zahřívání. Dlouhodobé vystavování PN přechodu a vůbec celého světelného zdroje vysoké teplotě, což může být už při teplotě okolí ϑ_0 větší než $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, a to znamená přibližnou teplotu PN přechodu ϑ_c okolo $110\text{ }^{\circ}\text{C}$. To způsobuje trvalé poškození LED čipu, které se projevuje snížením světelného toku, zkrácením životnosti nebo úplným zničením světelného zdroje. Míru poklesu světelného toku LED světelných zdrojů až pro teplotu okolí ϑ_0 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ znázorňuje

obr. 16. V naprosté většině se pro chlazení LED používají zpravidla žebrované hliníkové chladiče, které odvádějí teplo od LED modulu a přenášejí ho do okolního prostředí. Pro chlazení LED pásků se používají hliníkové profily, které jsou rovněž zprostředkovateli přenosu tepla od samotné LED do okolního prostředí [23].



Obrázek 16: Závislost parametrů LED na teplotě okolí [22]

2.6 Obecné vlivy prostředí na LED

Protože LED retrofity obsahují elektroniku, mohou být náchylné na elektrostatické pole. Samotné LED moduly jsou odolnější, případně obsahují prvky, které tuto odolnost zvyšují. Elektrostatické pole může LED i rozsvítit, a protože je to nestandardní chování, může to vést k poškození struktury čipu a k následným závadám.

LED moduly bývají velmi náchylné na vlhkost a v kombinaci s chemicky agresivním prostředím například v prostředí bazénů, koupelen, solných jeskyních chemických provozů a skladů se LED modul poškozuje. Plošný spoj nebo polovodičová struktura se postupně narušuje, dochází k nestandardnímu chování LED a nakonec přestane fungovat úplně. Případně jsou narušeny nechráněné přívody. V případě, že mají být LED moduly a LED retrofity určeny do prostředí, které vykazuje riziko narušení funkce ať už vlhkem nebo chemickými vlivy, je nutné svítidlo navhnout tak, aby bylo zajištěno řádné krytí a zároveň nebyl znemožněn odvod tepla od LED modulu do okolního prostředí.

V případě, že je svítidlo s použitým LED komponentem vyrobeno z nevhodného materiálu, může tento materiál měnit hodnotu teploty chromatičnosti. Například u LED pásku s vyšším krytím může způsobit nekvalitní zalévací hmota, kterou se krytí pásků vytváří. Posun teploty chromatičnosti v tomto případě nebývá rovnoměrná, ale u každé LED v pásku může být jiná a tak může takový pásek vykazovat různé hodnoty pro každou LED. [19].

2.7 Zdroje pro LED moduly a LED retrofity

Zdroje pro LED světelné zdroje, mezi výrobci a distributory též označovány jako drivery, jsou elektrická zařízení, která transformují síťové napětí 230 V na konstantní napětí případně proud pro potřeby LED modulu. Zdrojů pro LED existuje velké množství, liší se hlavně ve složitosti konstrukce, účinnosti transformace napětí, ceně, životnosti, kvalitě a v dalších parametrech.

Nejzákladnějším, nejjednodušším a nejlevnějším zdrojem je odporový nebo kapacitní zdroj. V principu se jedná pouze o snižování napětí na pasivních prvcích. Protože i pasivní prvky mají svou vlastní spotřebu, kterou nelze zanedbat, je účinnost těchto zdrojů malá. Také kvalita a životnost těchto zdrojů je právě díky své jednoduchosti nízká.

Mnohem lepší, účinnější a kvalitnější, ale konstrukčně složitější jsou spínané zdroje. V principu jsou ale jednoduché - vstupní napětí spínaného zdroje je usměrněno a vyfiltrováno. Toto stejnosměrné napětí je převedeno na střídavé napětí o frekvenci v řádu stovek kHz, které je transformováno na nižší hodnotu a nakonec opět usměrněno a vyfiltrováno. Vysoká frekvence je u tohoto typu zdroje použita z důvodu efektivnějšího využití transformátorů a tím pádem lze ve zdroji použít transformátor menších rozměrů, než u klasického zdroje, který pracuje se síťovou frekvencí 50 Hz. Typické uspořádání LED retrofitu včetně zdroje je ukázán na obr. 17 [24], [25].



Obrázek 17: Konstrukce LED retrofitu [21]

3 MĚŘICÍ METODY

Jedním z cílů diplomové práce je navrhnout měřicí řetězec pro měření světelně-technických a elektrických parametrů světelných zdrojů. Tato měření byla realizována v laboratoři světelné techniky na Ústavu elektroenergetiky na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně. Dalším cílem bylo vytvořit a zpracovat teplotní analýzu LED světelných zdrojů při různé teplotě okolí ϑ_0 .

3.1 Provozní parametry světelných zdrojů

Provozní parametry se dají rozdělit na dvě základní podskupiny – světelně-technické parametry a elektrické parametry. Mezi nejdůležitější světelně-technické parametry patří především světelný tok Φ , teplota chromatičnosti T , index barevného podání Ra a vyzařované spektrum. Mezi elektrickými parametry jsou nejvýznamnější jmenovité napětí U , jmenovitý proud I a činný příkon P , jalový příkon Q a zdánlivý příkon S .

Světelně-technické parametry

- Světelný tok Φ je základním světelně-technickým parametrem, počítají se z něj další důležité parametry. Při měření světelného toku je pro porovnávání parametrů podstatné jeho množství bez ohledu na jeho prostorové rozložení, je potřeba ho měřit ve všech směrech vyzařování. Pro určení tohoto množství je potřeba určit elementární světelný tok v elementárním prostorovém úhlu. Sumací všech elementů světelného toku přes všechny směry vyzařování, pak lze získat úhrnný světelný tok. Pro světelný tok Φ_λ monochromatického záření platí rovnice 4.1

$$\Phi_\lambda = K(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_{e\lambda}, \quad (4.1)$$

kde

Φ_λ - světelný tok monochromatického záření vlnové délky λ (lm),

$K(\lambda)$ - světelná účinnost monochromatického záření vlnové délky λ (lm/W),

$\Phi_{e\lambda}$ - zářivý tok monochromatického záření vlnové délky λ (W),

$V(\lambda)$ - poměrná světelná účinnost záření vlnové délky λ (-),

$$\Phi = \int_{4\pi} I(\gamma, \nu) \cdot d\omega, \quad (4.2)$$

kde

Φ - světelný tok (lm)

γ, ν - elementy světelného toku

- Měrný světelný výkon η je jedním z nejsledovanějších parametrů. Je dán poměrem změřeného světelného toku Φ světelného zdroje a jeho příkonu P . Vyjadřuje, jaké množství světelné energie je světelný zdroj schopný

přetransformovat z 1 W elektrické energie, je určen vztahem 4.3. Pojem měrný světelný výkon je relativní protože záleží na spektrálních vlastnostech světelného zdroje. Je definován následovně:

$$\eta = \frac{\Phi}{P}, \quad (4.3)$$

kde

Φ – světelný tok (lm)

P – příkon světelného zdroje (W)

- Teplota chromatičnosti T vyjadřuje charakter spektra bílého světla. Hodnota odpovídá teplotě absolutně černého rozžhaveného tělesa v Kelvinech, z něhož vychází jak tepelné, tak světelné záření. Podrobněji je tomuto parametru věnován odstavec v kapitole 2.2. Podobně pro charakterizaci monochromatického světla platí rovnice 4.4:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{\Theta_{\text{black}}} = \frac{\lambda k}{hc} \ln \alpha_{\lambda}, \quad (4.4)$$

kde

α_{λ} – relativní spektrální pohltivost světla u povrchu zářiče

Θ_{black} – teplota zářiče při dané vlnové délce λ (K)

- Index podání barev Ra udává jak spektrum, vyzařované světelným zdrojem ovlivňuje zrakový vjem člověka a zkreslení barev předmětů, které jsou daným světelným zdrojem osvětlovány při zohlednění různé citlivosti lidského zraku na různé vlnové délky záření. Podrobněji je tomuto parametru věnován odstavec v kapitole 2.2. Index barevného podání lze vypočítat ze souřadnic kolorimetrického prostoru UVW, který vychází z trichromatického trojúhelníku. Vztah pro výpočet Ra z odchylek od referenčních vzorků v UVW souřadnicích je uveden následujícím vztahem.

$$Ra = 100 - 4,6 \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(U_{oi} - U_{ki})^2 + (V_{oi} - V_{ki})^2 + (W_{oi} - W_{ki})^2}, \quad (4.5)$$

kde

U, V, W – souřadnice v trichromatické soustavě

- Spektrum vyzařované světelným zdrojem je sledováno například z důvodu zastoupení jednotlivých složek spektra, z důvodu intenzity záření na těchto složkách a v neposlední řadě je sledována spojitost a rozložení zastoupených složek. Při nevhodném poměru jednotlivých nebo jen některých složek spektra může být světelný zdroj při dlouhodobém vystavení zdraví nebezpečný.
- Náběh světelného toku v čase velmi souvisí s účelem použití světelného zdroje. Žádný světelný zdroj se po zapnutí nedostane v nulovém čase na plný světelný tok, vždy ho dosáhne v určitém čase. Například u retrofitu se tento čas pohybuje

v řádech vteřin, u zářivek v řádech minut a u výbojek to může být dokonce v řádech desítek minut.

- Oteplení povrchu světelného zdroje v čase je zkoumáno především u LED zdrojů světla z důvodu ověření efektivnosti chladiče a přehřívání světelného zdroje. Jestliže se povrch rychle zahřívá, znamená to, že chladič není dostatečný, aby odvedl odpadní teplo od LED čipu, a ten se potom přehřívá. U jiných světelných zdrojů to může být například z důvodu bezpečnosti.
- Provozní teplota ϑ je dalším důležitým sledovaným parametrem, hlavně pro LED zdroje světla. K měření se nejčastěji používají kontaktní i bezkontaktní měřicí metody, u bezkontaktní metody je problém s různou emisivitou povrchu, což by mohlo být termokamerou chybně vyhodnoceno. Řešením by mohl být jednotný barevný nástřik, který by emisivitu různých povrchů sjednotil. Kontaktní měření naráží na problém při měření teploty PN přechodu, přímo k přechodu se nelze dostat a nelze ho tak přesně změřit.
- Křivky svítivosti jsou v praxi ve světelné technice také často měřeným parametrem. Měření se provádí luxmetrem v jedné vzdálenosti od svítidla. Jednotlivé hodnoty se vypočítají jako součin naměřené osvětlenosti E a druhé mocniny vzdálenosti čidla luxmetru od světelného zdroje [5].

Elektrické parametry

- Jmenovité napájecí napětí U je nejdůležitějším elektrickým parametrem světelného zdroje. U všech světelných zdrojů platí, že špatnou volbou napájecího napětí je možné tento zničit. Výrobce je povinen napájecí napětí na výrobku, případně na obalu vždy uvádět.
- Jmenovitý napájecí proud I je ustálená hodnota proudu, která by při standardním provozu světelného zdroje při jmenovitém napájecím napětí neměla být překročena.
- Příkon P světelného zdroje je dalším velmi důležitým sledovaným parametrem. Tento parametr by výrobce samozřejmě měl taky na zařízení uvádět. Příkon světelného zdroje je nutné měřit v komplexní rovině jako příkon obecné impedance, protože vlivem používání spínaných zdrojů u většiny světelných zdrojů může být důležitý podíl jalové složky, a tudíž nebude možné ji zanedbat a brát zařízení za čistě odporovou zátěž. Hlavně u veřejného osvětlení může docházet k úbytkům napětí na vedení, proto je vhodné měřit wattmetrem příkon zdrojů světla i v závislosti na napětí a také prověřit, jestli není příkon po zapnutí světelného zdroje vyšší, než při jeho provozu [5].
- Účinník $\cos \phi$ udává poměr činné a zdánlivé složky odebírané energie, vyjadřuje, jaké množství činné energie na první harmonické dokáže spotřebič dle svého charakteru využít z energie zdánlivé. Vyjadřuje kosinus fázového posunu mezi

napětím a proudem. Je snaha, aby se účinník blížil jedné, proto se k dosažení tohoto požadavku provádí kompenzace.

- Celkový účinník PF (power factor) je podobně jako účinník vyjádření poměru činné a zdánlivé složky odebírané energie, ale se zohledněním i vyšších harmonických.
- Vliv vyšších harmonických proudů I_h je důležité prověřit z důvodu používaných spínaných zdrojů, zda nedochází ke zkreslení, a tím k rušení rozvodné sítě. Při odebírání vyšších harmonických vznikají na vedení neharmonické napěťové úbytky, které jsou nežádoucí.
- Křížové charakteristiky jsou grafické znázornění relativních hodnot vybraných parametrů světelných zdrojů v závislosti na napájecím napětí.

3.2 Extrémní provozní podmínky

Mezi extrémní podmínky při provozu LED světelných zdrojů se řadí nejčastěji provoz při vysoké teplotě v okolí ϑ_0 světelného zdroje nebo provoz při vyšším napětí, než je výrobcem udávané jmenovité napětí nebo napětí, které se v čase rychle a ve velkém rozsahu mění. Poslední ze jmenovaných není až takový problém a napájecí zdroje LED světelných zdrojů dokážou tento problém eliminovat. Tento problém je záležitostí kvality elektrické energie, kterou je světelný zdroj napájen.

První ze dvou hlavních extrémních stavů při provozování LED světelných zdrojů je teplota. Lze se s ní setkat například v případě uzavřeného LED světelného zdroje například v baňce svítidla, v níž je znemožněn odvod odpadního tepla, které LED při svém provozu vyprodukuje. Dalším z příkladů může být LED světelný zdroj instalovaný ve výrobních halách pod konstrukcí střechy, kde se může podle povahy provozu v hale a podle ročního období pohybovat teplota okolí ϑ_0 i přes 70 °C. Měření v rámci této práce mají za cíl simulovat tyto stavy a dokázat, jakým způsobem se tento provoz podepisuje na světelných parametrech testovaných světelných zdrojů a na jejich životnosti.

Vzhledem k dostupnému vybavení lze fotometrické parametry měřit pouze před a po zahřátí světelného zdroje. Rozsvícený LED světelný zdroj je umístěn do zkušební teplotní komory a teplota okolí ϑ_0 je postupně zvyšována až na teplotu 120 °C. Při této teplotě by se měly projevit negativní vlastnosti LED čipu a zároveň by neměla být teplotou narušena konstrukce světelného zdroje. Během tepelné zkoušky lze měřit pouze teploty v prostoru zkušební komory ϑ_0 a teplotu na chladiči ϑ_{ch} případně v těsné blízkosti LED čipu světelného zdroje ϑ_c . Fotometrické parametry jsou měřeny před tepelnou zkouškou a po ní. Rozdíl mezi měřeními za stejných podmínek odhalí míru trvalého poškození LED čipu světelného zdroje, případně i napájecího zdroje a vliv na garantovanou životnost světelného zdroje. Čím lépe a

kvalitněji mají světelné zdroje vyřešený odvod tepla od čipu do okolí světelného zdroje, tím lepší šance obstát v měření se předpokládá.

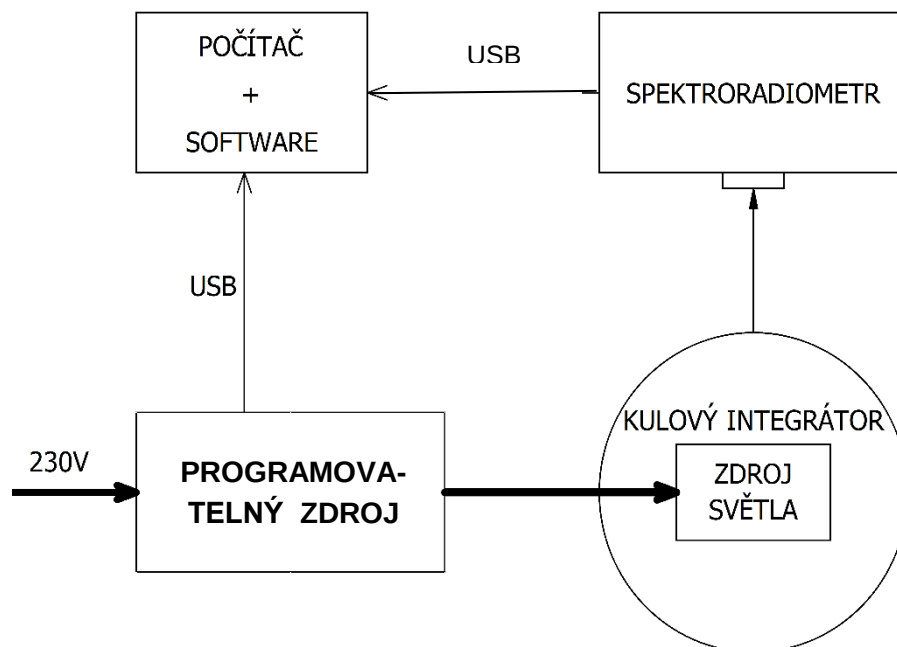
Při ověřování druhého největšího provozního extrému – napětí vyššího než jmenovitého U se více než samotné světelné zdroje projevují spíše jejich napájecí zdroje. V naprosté většině případů jsou tyto napájecí zdroje konstruovány tak, aby se bez problému vyrovnaly s kolísáním napájecího síťového napětí zpravidla v rozsahu $\pm 10\%$. Méně kvalitní napájecí zdroje nevydrží ani toto 10% navýšení jmenovitého napětí, kvalitnější vydrží i více, ale v některých případech se napájecí zdroj pouze částečně poškodí a chovají se nestandardně. Cílem diplomové práce je změřit, jaký má zvýšené napětí vliv na změnu ostatních veličin. Postupným zvyšováním napájecího napětí za stálého měření fotometrických parametrů lze zjistit, jak se při tomto zvýšeném napájecím napětí světelný zdroj projevuje.

3.3 Měření základních fotometrických veličin

Při měření světelných parametrů jako světelný tok ϕ , teplota chromatičnosti T , index barevného podání Ra a spektrum, které světelný zdroj vyzařuje, se používá kulový integrátor. Jedná se o dutou kouli, jejíž vnitřní stěna je natřena bílou, dokonale odrazivou, rozptýlnou a barevně neselektivní vrstvou (oxid hořečnatý), která umožňuje vícenásobný odraz světelného záření uvnitř kulového integrátoru. Kromě odrazivé vrstvy obsahuje kulový integrátor referenční žárovku o známém světelném toku, která je kryta clonou, tudíž příspěvek světelného toku od této žárovky je vždy odrazem. Do okénka kulového integrátoru byl umístěn spektrometr scb1211UV S/N 2015926, který byl prostřednictvím USB připojen k měřicímu počítači a data byla přenášena do prostředí JETI a následně ukládána. Napájení měřeného světelného zdroje bylo připojeno čtyřvodičově k programovatelnému napájecímu zdroji APT 300XAC, který sloužil rovněž jako analyzátor sítě. Napájecí zdroj byl rovněž prostřednictvím USB připojen k počítači, ve kterém se v příslušném programu dala jednak nastavovat hodnota napětí na měřeném objektu, tak byly ve zvolených časových intervalech měřeny potřebné základní elektrické parametry.

Měření základních elektrických a fotometrických veličin dává základní informace o měřeném světelném zdroji. Po analýze těchto naměřených parametrů lze usuzovat o kvalitě a v omezené míře i o životnosti daného světelného zdroje. V tomto případě bude cílem měření vyjádřit míru dočasného a trvalého poškození teplem u LED světelných zdrojů. U světelného zdroje jsou první změřeny základní elektrické a fotometrické veličiny při konstantním jmenovitém napájecím napětí. Následně je světelný zdroj podroben tepelné zkoušce a po ní jsou opět změřeny základní elektrické a fotometrické veličiny. Na základě porovnání těchto naměřených hodnot lze stanovit vliv vystavení světelného zdroje vyšší okolní teplotě a jeho trvalé

poškození – ať už LED čipu nebo napájecího zdroje. Pro tato měření je vybavena Laboratoř světelné techniky na UEEN. Měřicí řetězec je znázorněn na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**



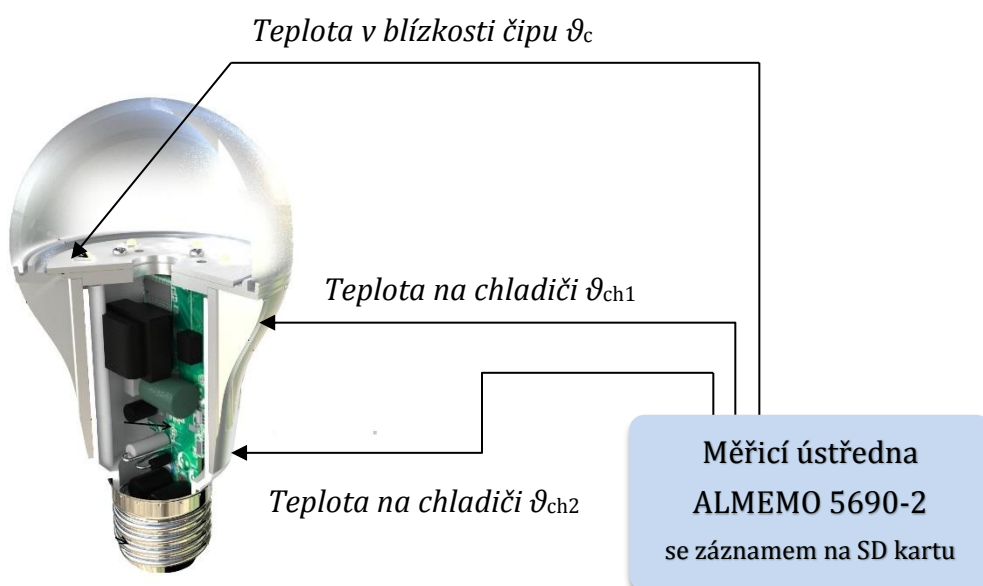
Obrázek 18: Měřicí řetězec pro měření světelně technických parametrů a elektrických parametrů při jmenovitém napájecím napětí spektrometrem CS-1000A a analyzátozem sítě SMP44, KMB SYSTEMS.

Pomocí tohoto měřicího řetězce lze zároveň zkoumat vliv napájecího napětí, které lze libovolně regulovat. Výsledkem měření jsou křížové charakteristiky – závislosti elektrických a fotometrických veličin na napájecím napětí.

3.4 Tepelná zkouška LED světelných zdrojů

Tepelná zkouška světelného zdroje spočívá ve vystavení světelného zdroje působení určité teploty po stanovenou dobu nebo do ustálení teplot na konstantní hodnotě. Světelný zdroj je umístěn v tepelné komoře CTS a je rozsvícen. Teplota uvnitř tepelné komory ϑ_0 je zpočátku shodná s teplotou v místnosti a postupně byla zvyšována. Po celou dobu měření jsou zaznamenávány teploty na LED čipu ϑ_c , na několika místech chladiče ϑ_{ch} v různé vzdálenosti od LED čipu a v prostoru samotné tepelné komory ϑ_0 , jak znázorňuje měřicí řetězec na obr. 19.

V první části měření se provádí teplotní analýza samotného světelného zdroje, tj. pouze analýza tepla, které světelný zdroj sám vyprodukuje. Toto teplo by měl být chladič světelného zdroje schopen bez problému odvést od LED čipu do okolí světelného zdroje. V další části měření je postupně teplota v komoře ϑ_0 zvyšována v několika stupních až do 120 °C, vždy po ustálení většiny teplot ve sledovaných bodech.



Obrázek 19: Měřicí řetězec měření teplot světelného zdroje v teplotní komoře v jednotlivých bodech světelného zdroje

3.5 Napěťové vlivy na LED světelné zdroje

Protože jsou pro dnešní typy LED retrofitů používány zpravidla spínané zdroje, které mají velký rozsah vstupních napětí, nebývá změna nebo kolísání napětí pro tyto světelné zdroje až tak velký problém. Dokonce i výrobci na svých produktech už většinou neuvádějí přesné jmenovité napětí, ale uvádějí, v jakém rozsahu se může pohybovat. Proto se nepředpokládá, že by se mohly světelné parametry při napájení

v tomto napěťovém rozsahu výrazně měnit. Problém nastává až při zvyšování napětí za mez, na kterou je napájecí zdroj konstruován. V tomto případě nedojde ani tak k poškození samotné LED, ale v naprosté většině případů dojde k poruše ve vstupním obvodu napájecího zdroje.

Při úvaze druhého extrému – nízkého napájecího napětí jsou podle konstrukce napájecího zdroje možné dva případy, jedním z nich je, že při podkročení nějaké mezní hodnoty napájecího napětí se bude světelný tok snižovat a poté prudce klesne k nule. Nebo ve druhém případě klesne k nule ihned po podkročení dané mezní hodnoty.

V mnoha případech, ve kterých chtějí výrobci na napájecím zdroji ušetřit, používají místo kvalitního spínaného zdroje pouze kombinaci kondenzátoru s odporem, na které snižují napětí pro potřeby daného LED čipu.

4 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

U zkoumaných světelných zdrojů bylo měření zaměřeno zejména na analýzu vyzařovaného spektra a jeho změny tepelnou zkouškou, dále na měření doby, za kterou se světelné technické parametry ustálí na konstantní hodnotě a na průběh těchto parametrů v čase. V neposlední řadě byl zkoumán vliv různé okolní teploty na přehřívání LED čipu a vůbec celého LED retrofitu a vliv různého napájecího napětí.

4.1 Popis experimentu

Všechny měřené světelné zdroje byly postupně vloženy do kulového integrátoru, který zajišťuje a podle měřicího řetězce na obr. 18 bylo postupně spektrometrem změřeno spektrum, vyzařované měřeným světelným zdrojem a následně ze spektra převedeny ostatní fotometrické veličiny. U každého měřeného světelného zdroje byly rovněž měřeny elektrické parametry pomocí programovatelného zdroje, přes který byl měřený světelný zdroj napájen. Protože to napájecí zdroj umožňoval, byly z něho světelné zdroje připojovány čtyřvodičově, tudíž bylo odděleno napájení samotného světelného zdroje a měření napětí bylo měřeno přímo na něm. Tímto způsobem byl eliminován vliv napájecích přívodů, které při délce několika metrů mohly mít na měření vliv.

Po změření elektrických a světelně-technických parametrů všech světelných zdrojů byly na jednotlivé světelné zdroje na chladič a v blízkosti LED čipu připevněny termočlánky, které kontaktně a se zanedbatelnou odezvou měřily teplotu v daných bodech světelných zdrojů. Měřené teploty byly zaznamenávány měřicí ústřednou ALMEMO. Celé schéma měření teplot je znázorněno na obr. 19. V první fázi bylo cílem zjistit jak se světelné zdroje oteplují při běžných podmínkách a běžné teplotě, proto byly připojeny k napájecímu napětí a byly měřeny jejich oteplovací charakteristiky při teplotě okolí $\vartheta_0 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po ustálení všech teplot byly světelné zdroje odpojeny od napájení a byly měřeny průběhy ochlazování. V další fázi byly měřeny oteplovací charakteristiky světelných zdrojů připojených k napájení při umělé teplotě okolí pomocí klimakomory. Výchozí teplota okolí byla $\vartheta_0 = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Postupně byla nastavována teplota na $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po ustálení teplot pro teplotě okolí $\vartheta_0 = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ byly světelné zdroje odpojeny od napájení a okolní teplota v klimakomoře byla nastavena na $\vartheta_0 = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Protože bylo cílem prověřit, jak velkérvalé poškození LED čipu, luminoforu a napájecího zdroje vysoká teplota způsobí.

Po skončení tepelných měření v klimakomoře následovalo stejné měření světelně-technických a elektrických parametrů jednotlivých světelných zdrojů jako na začátku. Výsledkem jsou naměřená data pro srovnání případných poškození.

4.2 Přehled provozních parametrů světelných zdrojů

Měření bylo podrobena celkem devět LED světelných zdrojů, z nichž dvě dvojice byly stejného typu od stejného výrobce, koupené v časovém odstupu půl roku. V tab. 2 je přehled elektrických a světelně technických parametrů jednotlivých zdrojů, po jejich ustálení. Měřeny byly následující světelné zdroje:

Zdroj 1 – LED retrofit filament LIVARNO	4 W,	420 lm,	2700 K,	220 – 240 V
Zdroj 2 – LED retrofit LED STAR OSRAM	8 W,	806 lm,	2700 K,	220 – 240 V
Zdroj 3.1 – LED retrofit IKEA,	11 W,	600 lm,	2700 K,	220 – 240 V
Zdroj 3.2 – LED retrofit IKEA	11W,	600 lm,	2700 K,	220 – 240 V
Zdroj 4 – LED retrofit AIGOSTAR A55	9 W,	720 lm,	3000 K,	230 V
Zdroj 5 – LED retrofit LIVARNO	10 W,	806 lm,	2700 K,	220 – 240 V
Zdroj 6.1 – LED retrofit AFIMO	5 W,		3500 K,	230 V
Zdroj 6.2 – LED retrofit AFIMO	5 W,		3500 K,	230 V
Zdroj 7 – LED retrofit LED LABS	8 W,	650 lm,	3000 K,	230 V

Tabulka 2: Přehled změřených parametrů světelných zdrojů

	Zdroj 1	Zdroj 2	Zdroj 3.1	Zdroj 3.2	Zdroj 4	Zdroj 5	Zdroj 6.1	Zdroj 6.2	Zdroj 7
Φ (lm)	448,1	735	596,5	602,3	693,9	738,1	356,1	327,3	599,1
T (K)	2700	2813	2816	2708	3515	2773	3119	2991	2983
η (lm/W)	117,9	93,03	57,35	57,59	80,68	82,93	63,58	67,18	74,89
Ra (-)	80,8	81,07	93,2	93	81,15	81,29	71,53	71,0	80,57
U (V)	230,2	230,2	230,2	230,2	230,2	230,2	230,2	230,2	230,2
I (A)	0,03	0,06	0,05	0,49	0,08	0,08	0,05	0,054	0,06
f (Hz)	50	50	50	50	50	50	50	50	50
P (W)	3,8	7,9	10,4	10,9	8,6	8,9	5,6	5,9	8,0
S (VA))	7,3	13,5	10,8	11,5	18,4	17,4	11,5	11,9	14,7
Q (Var)	6,2	10,9	2,9	3,1	16,2	14,9	10,0	10,4	12,3
PF (-)	0,52	0,58	0,96	0,92	0,47	0,51	0,48	0,45	0,54

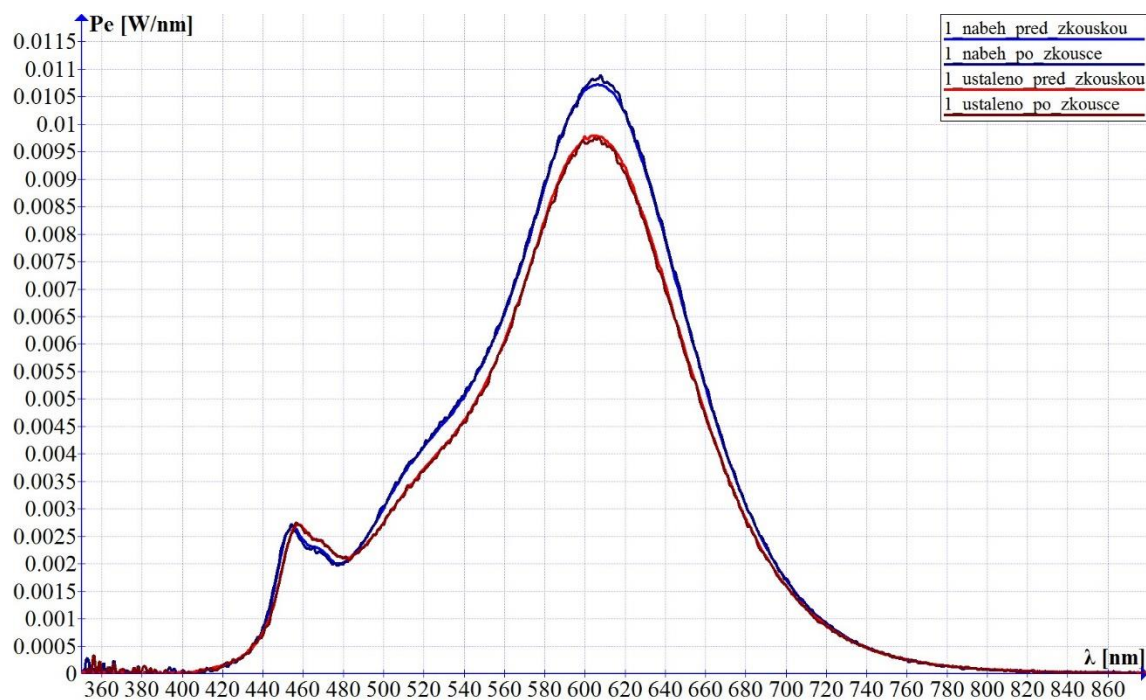
4.3 Spektrum měřených LED světelných zdrojů

Měřené spektrum, které daný světelný zdroj vyzařuje je základem všech ostatních světelně technických parametrů, většina z nich z něj vychází, dá se z něj vypočítat nebo odvodit. Proto je právě spektru věnován takový prostor a na následujících grafech je ukázáno nejen, jak se liší spektra různých typů světelných zdrojů a různých světelných zdrojů stejného typu. Je zde viditelné srovnání spekter

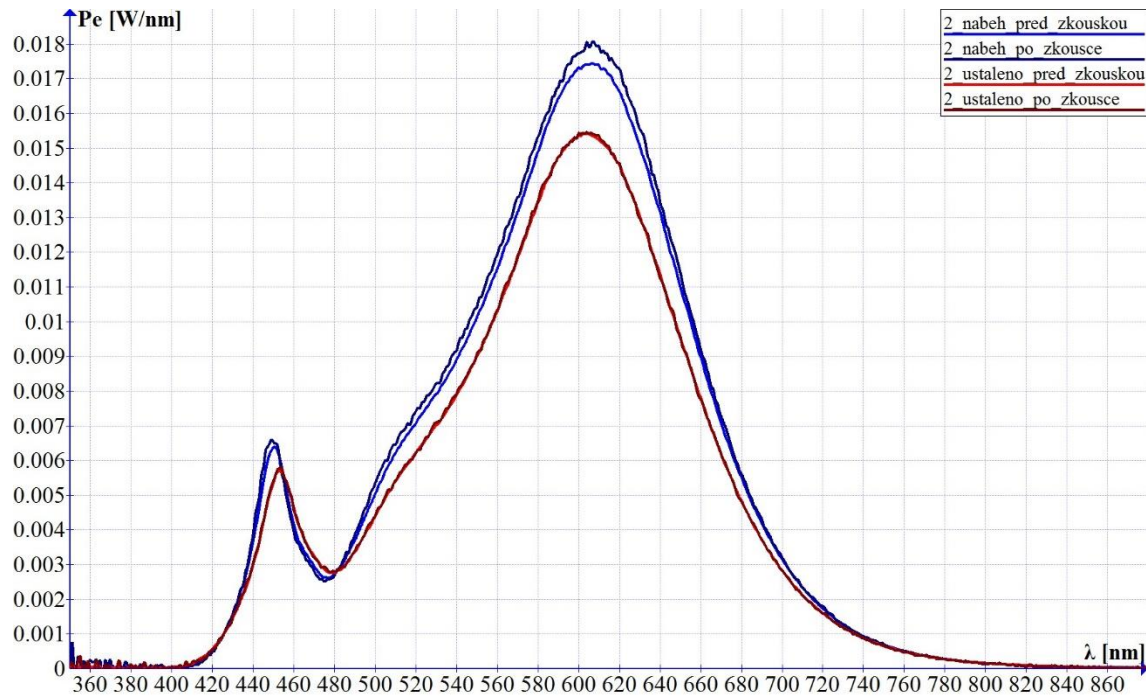
v okamžiku zapnutí světelného zdroje a po ustálení hodnot, stejně tak je patrný vliv tepelné zkoušky a její vliv na změnu spektra.

Typické spektrum LED se skládá ze dvou oblastí, jedné v oblasti modré a druhé v oblasti teplejších tónů (delších vlnových délek). Poměr velikosti těchto oblastí udává výslednou teplotu chromatičnosti světelného zdroje. Když převažuje první oblast nad druhou, znamená to, že LED, použitá ve světelném zdroji více energie vyzáří přímo a méně transformuje prostřednictvím luminoforu, výsledná teplota chromatičnosti dosahuje vyšších hodnot a pozorovateli se potom takový světelný zdroj jeví jako studený bílý. Při opačném poměru oblastí dochází k transformaci většího množství záření do oblasti delších vlnových délek a teplota chromatičnosti dosahuje nižších hodnot. Světelný zdroj se jeví jako teple bílý.

Ve většině případů je z grafů patrné, že způsobené jednorázové vystavení LED retrofitů vysoké teplotě má jen nepatrný vliv na změnu spektra. Světlo modře znázorněné je spektrum světelného zdroje ihned po připojení k napájení, světlo červená znázorňuje spektrum po ustálení parametrů. Tmavé odstíny vyjadřují spektra po tepelné zkoušce, modrá opět po připojení k napájení a červená po ustálení parametrů. K výrazným změnám spektra vlivem vysoké teploty během teplotní zkoušky došlo u zdrojů 3.2, 6.1 a 6.2, posunutí spektra hlavně v oblasti delších vlnových délek je viditelné na obr. 23, v rámci celých spekter potom na obr. 26 a 27. U ostatních spekter vysoká teplota způsobila pouze, že průběhy nejsou tak hladké jako před tepelnou zkouškou. V případě zdroje 2 na obr. 21 došlo po tepelné zkoušce pouze k mírnému navýšení světelného toku po připojení světelného zdroje k napájení, po ustálení parametrů se dostaly na stejné hodnoty jako před tepelnou zkouškou.



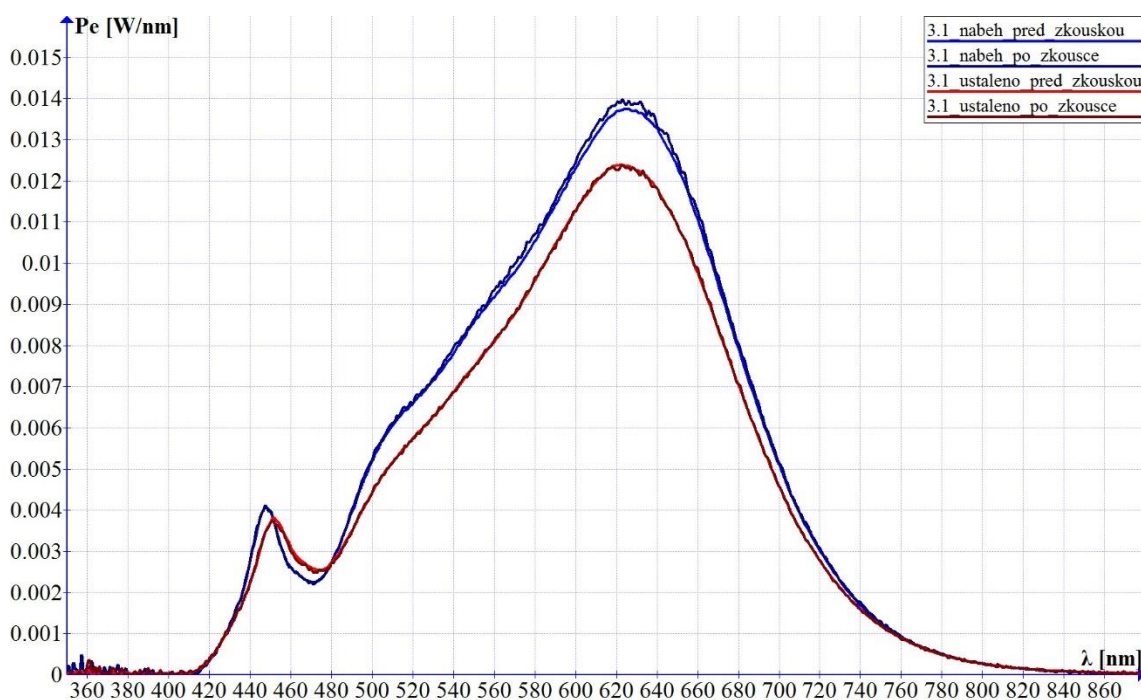
Obrázek 20: Spektrum vyzařované zdrojem 1 po zapnutí a po ustálení hodnot, před a po tepelné zkoušce, změřeno spektrometrem JETI specbos 1211UV



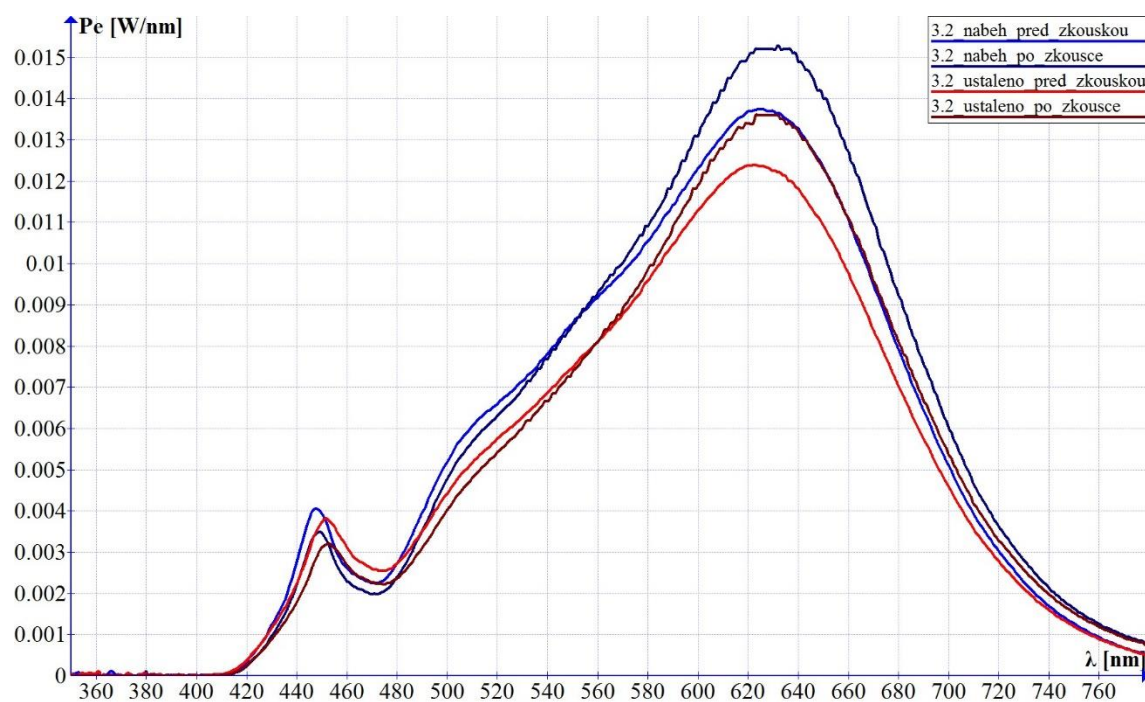
Obrázek 21: Spektrum vyzařované zdrojem 2 po zapnutí a po ustálení hodnot, před a po tepelné zkoušce, změřeno spektrometrem JETI specbos 1211UV

Spektrum zdroje 5 na obr. 25 je naopak shodné před a po tepelné zkoušce v oblasti delších vlnových délek a lze pozorovat rozdíl jen v oblasti kratších vlnových délek a to až po ustálení parametrů. Zdroj 4 na obr. 24, přesněji napájecí obvody zdroje 4 byly vlivem vystavení vysoké teplotě natolik poškozeny, že se tato LED retrofit po teplotní zkoušce už nerozsvítila.

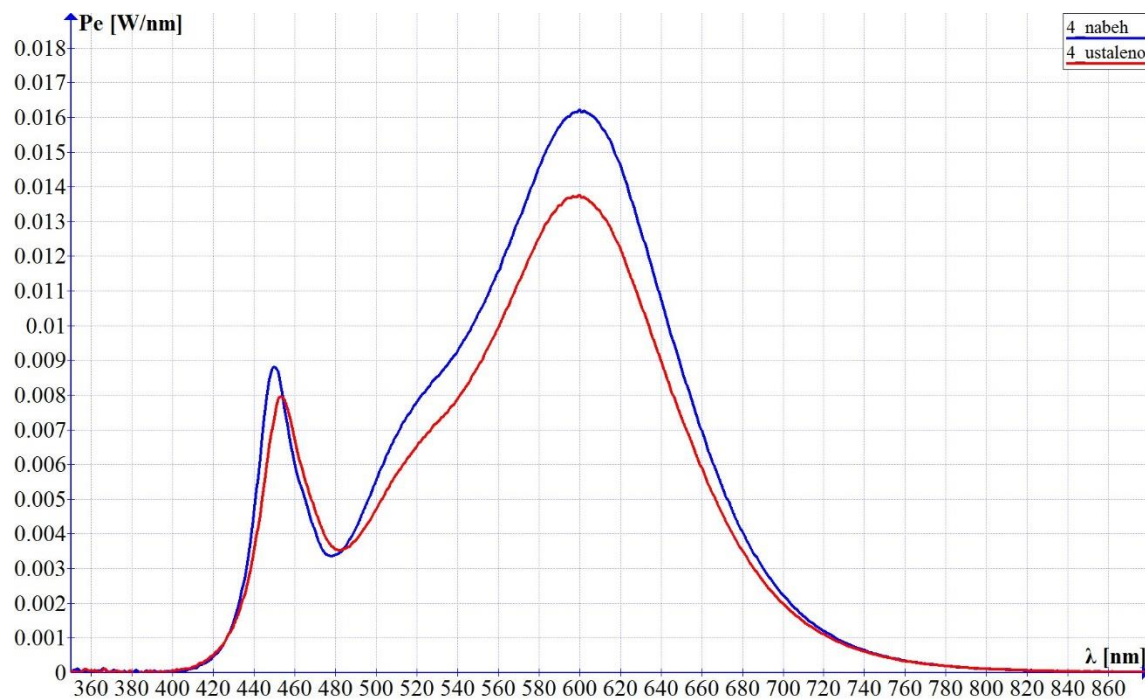
U zbylých testovaných světelných zdrojů 1, 3.1, se spektrum tepelnou zkouškou prakticky vůbec nezměnilo. Změny by se mohly projevit při dlouhodobějším nebo častějším vystavování vysokým teplotám.



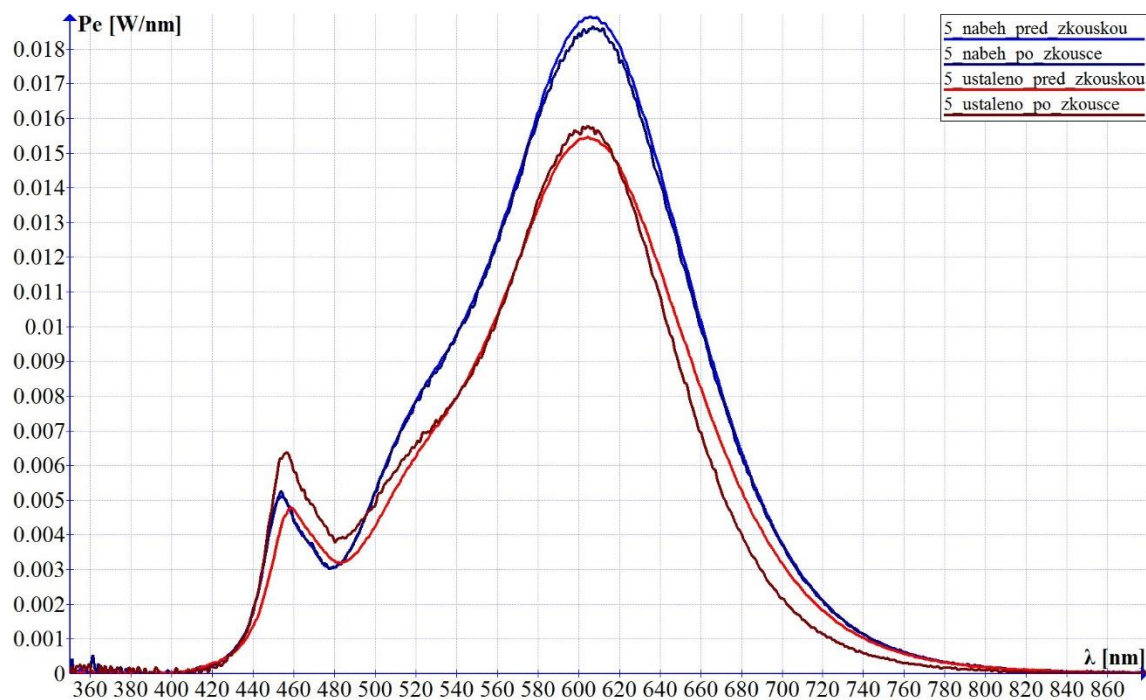
Obrázek 22: Spektrum vyzařované zdrojem 3.1 po zapnutí a po ustálení hodnot, před a po tepelné zkoušce, změřeno spektrometrem JETI specbos 1211UV



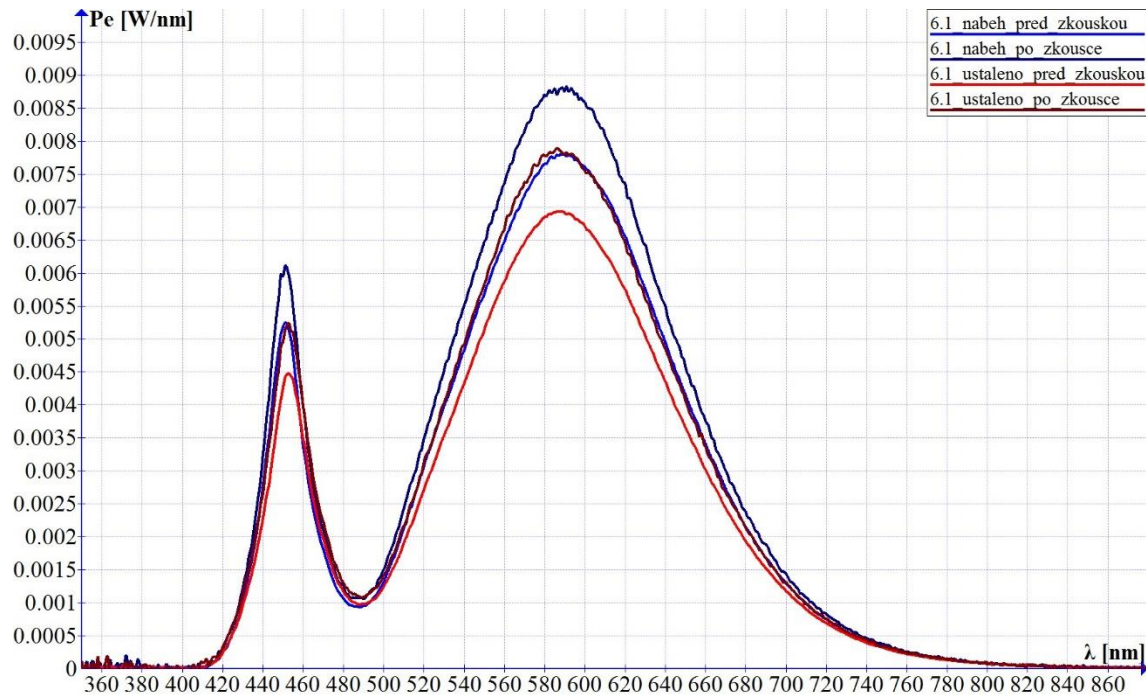
Obrázek 23: Spektrum vyzařované zdrojem 3.2 po zapnutí a po ustálení hodnot, před a po tepelné zkoušce, změřeno spektrometrem JETI specbos 1211UV



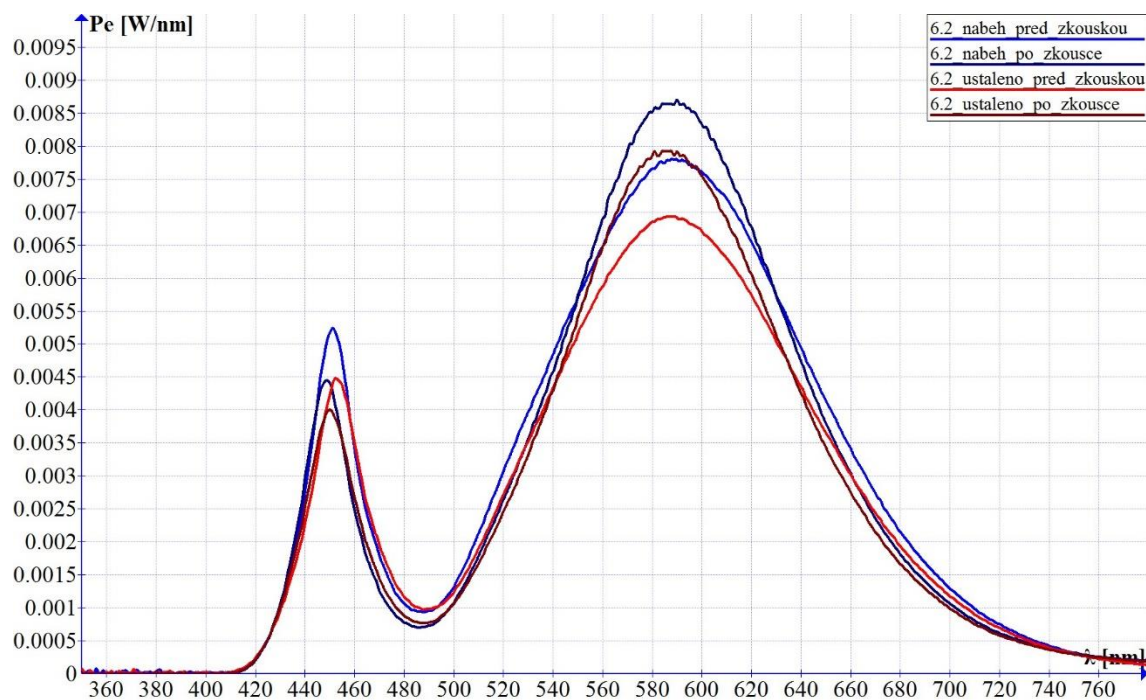
Obrázek 24: Spektrum vyzařované zdrojem 4 po zapnutí a po ustálení hodnot, změřeno spektrometrem JETI specbos 1211UV



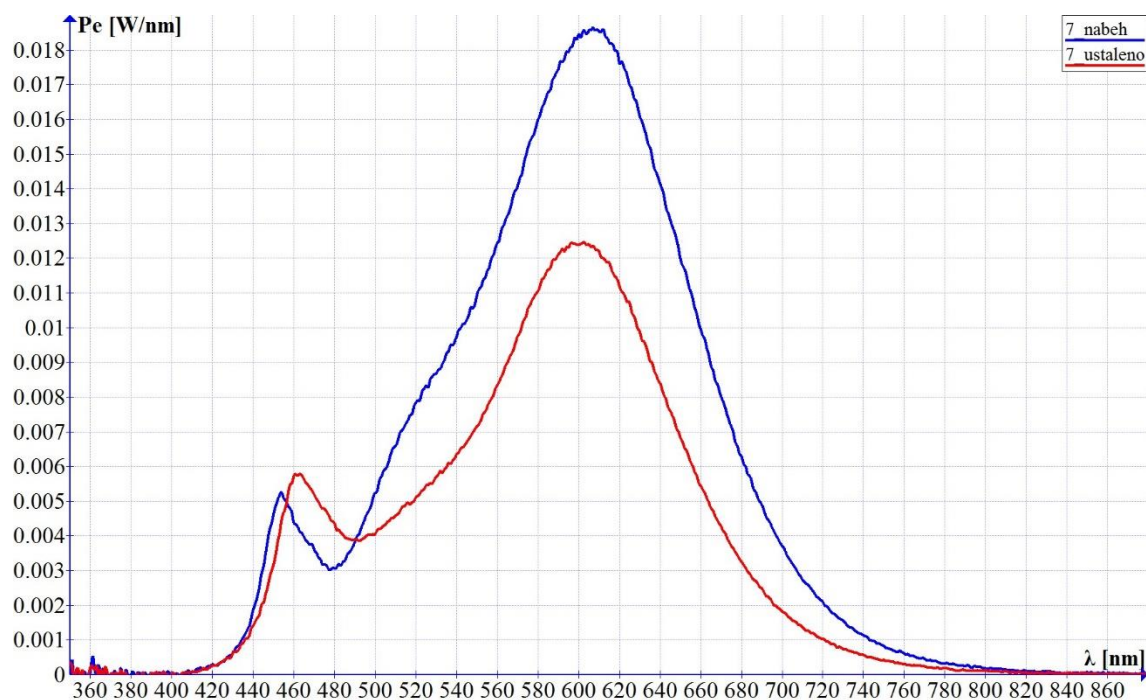
Obrázek 25: Spektrum vyzařované zdrojem 5 po zapnutí a po ustálení hodnot, před a po tepelné zkoušce, změřeno spektrometrem JETI specbos 1211UV



Obrázek 26: Spektrum vyzařované zdrojem 6.1 po zapnutí a po ustálení hodnot, před a po tepelné zkoušce, změřeno spektrometrem JETI specbos 1211UV



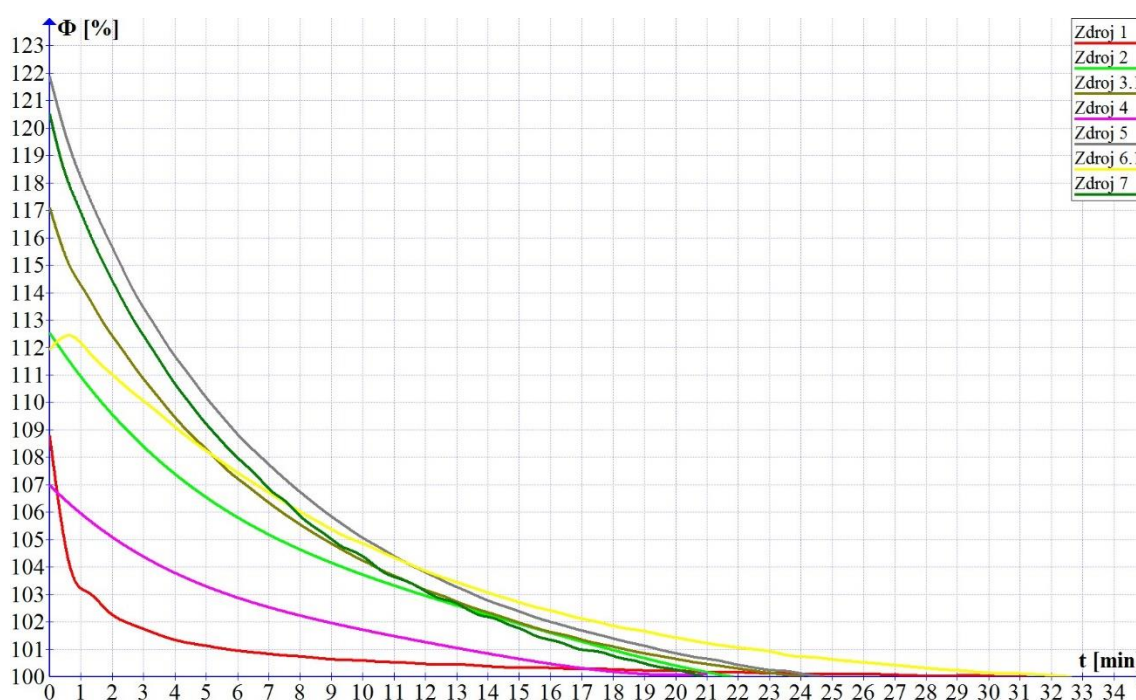
Obrázek 27: Spektrum vyzařované zdrojem 6.2 po zapnutí a po ustálení hodnot, před a po tepelné zkoušce, změřeno spektrometrem JETI specbos 1211UV



Obrázek 28: Spektrum vyzařované zdrojem 7 po zapnutí a po ustálení hodnot, změřeno spektrometrem JETI specbos 1211UV

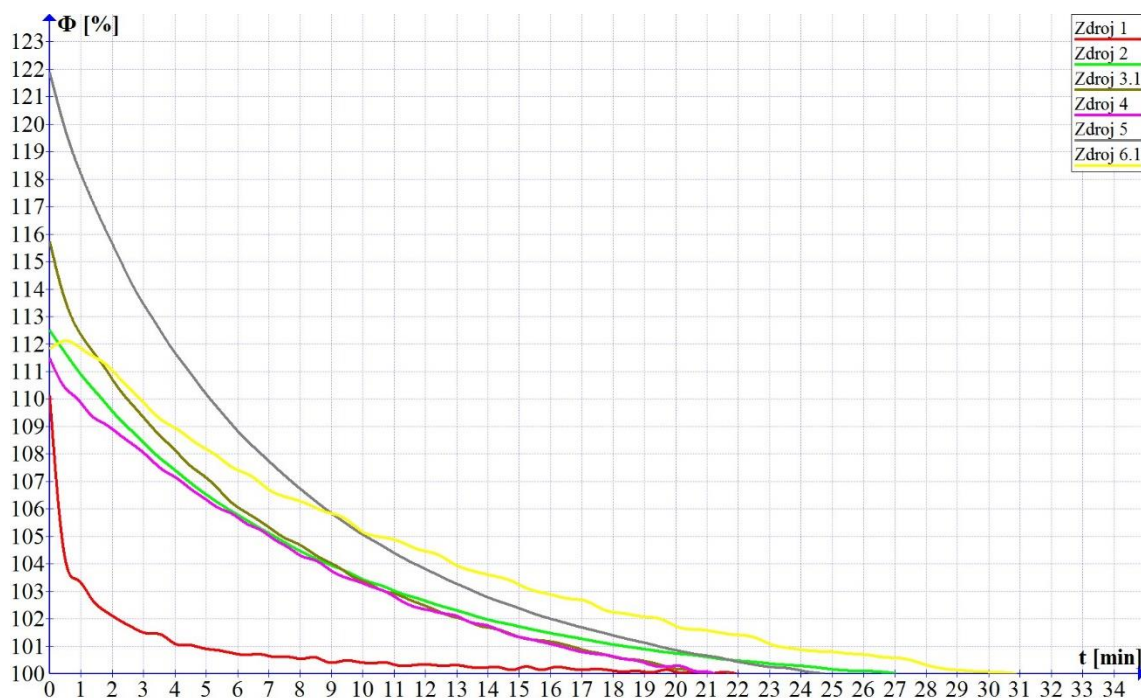
4.4 Vývoj parametrů v čase po připojení měřených LED světelných zdrojů k napájení

LED světelné zdroje jsou typické tím, že se po připojení napájecího napětí jejich parametry mění a po určité době se ustálí na konstantní hodnotě. Tyto změny parametrů jsou dány hlavně vlnem procesů, které probíhají v PN přechodu přímo v LED čipu. PN přechod se postupně zahřívá a časem se teplota ustálí na konstantní pracovní teplotě. Bohužel není s dostupnou technikou možné změřit závislosti světelně – technických a elektrických parametrů na teplotě PN přechodu, přineslo by to další velmi zajímavý pohled na tuto problematiku.



Obrázek 29: Vývoj světelného toku zdrojů po zapnutí před tepelnou zkouškou, změřeno spektrometrem JETI specbos 1211UV

Největší změna nastává u světelného toku Φ , který po připojení k napájecímu napětí prudce vzroste na hodnotu až 120 % ustálené hodnoty a potom postupně klesá. Přibližně do třiceti minut se světelný tok ustálí na konstantní hodnotě, jak je patrné z grafů na obr 29 a 30, kde je ustálená hodnota označena jako 100 %. V grafech je viditelná i různá změna vlivem teplotní zkoušky, u některých vzorků (1, 2, 6.1) se změna vůbec neprojevila, u ostatních zdrojů už ano. V některých případech došlo teplotní zkouškou pouze ke zvlnění časového průběhu. Zcela nejrychlejšího ustálení parametrů došlo u zdroje 1 vlivem jeho celkové konstrukce. Teplo od LED čipu je zde odváděno pouze přívodními vodiči a prostřednictvím plynu, kterým je naplněna baňka LED retrofitu. Tento plyn má jiný tepelný spád než klasické hliníkové chladiče a proto se samotný čip zahřeje na pracovní teplotu rychleji.

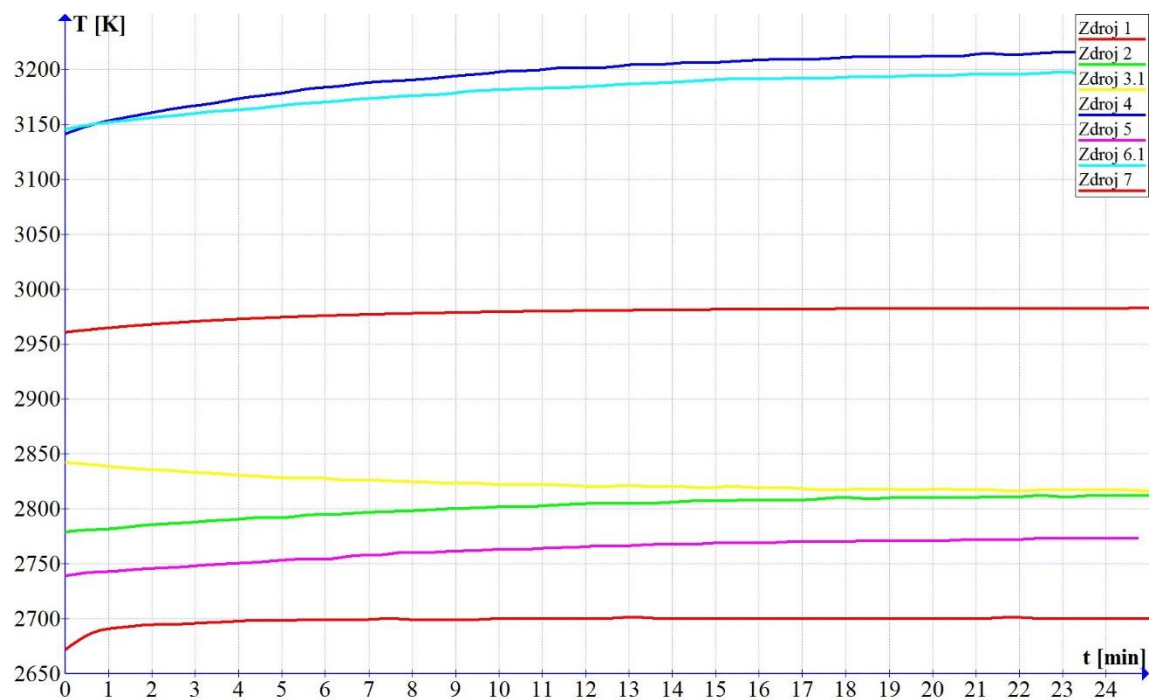


Obrázek 30: Vývoj světelného toku zdrojů v čase po zapnutí po tepelné zkoušce, změřeno spektrometrem JETI specbos 1211UV

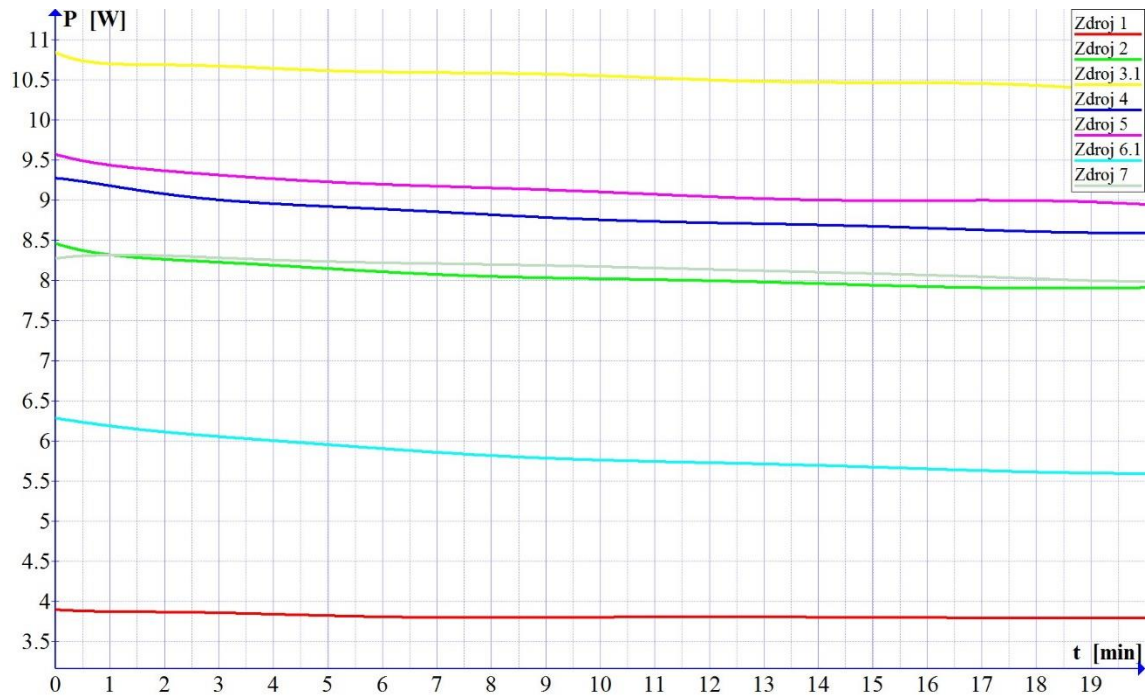
K změně dochází i u teploty chromatičnosti T a příkonu, odebíraného světelným zdrojem P . Ze změřených hodnot na obr. 31 vyplývá, že teplota chromatičnosti T ve většině případů mírně narůstá a přibližně do třiceti minut se ustálí na konstantní hodnotě. Jedinou výjimkou je zdroj 6.1, u kterého se po připojení k napájení projevuje pokles teploty chromatičnosti T , ale stejně jako u ostatních světelných zdrojů se přibližně do třiceti minut ustálí na konstantní hodnotě.

Odebíraný příkon P má oproti teplotě chromatičnosti T opačný, jak je vidět v grafu na obr. 32. Po připojení světelného zdroje ve většině případů příkon P mírně klesá. V jednom případě (u zdroje 7) příkon P mírně narůstá a potom klesá a v případě zdroje 1 je příkon P téměř konstantní hned od připojení světelného zdroje k napájecímu napětí.

Obecně lze tvrdit, že jsou tyto měnící se hodnoty teploty chromatičnosti T a odebíraného příkonu P téměř zanedbatelné ve srovnání se změnou světelného toku. Proto lze tvrdit, že jsou tyto dva parametry po dobu svícení světelného zdroje téměř konstantní. Výrobci často na svých výrobcích v případě teploty chromatičnosti udávají místo konstantní hodnoty rozsah, ve kterém se tato hodnoty může pohybovat protože je velmi závislá na výrobních postupech a na stárnutí luminoforu.



Obrázek 31: Vývoj teploty chromatičnosti zdrojů v čase po zapnutí, změřeno spektrometrem JETI specbos 1211UV

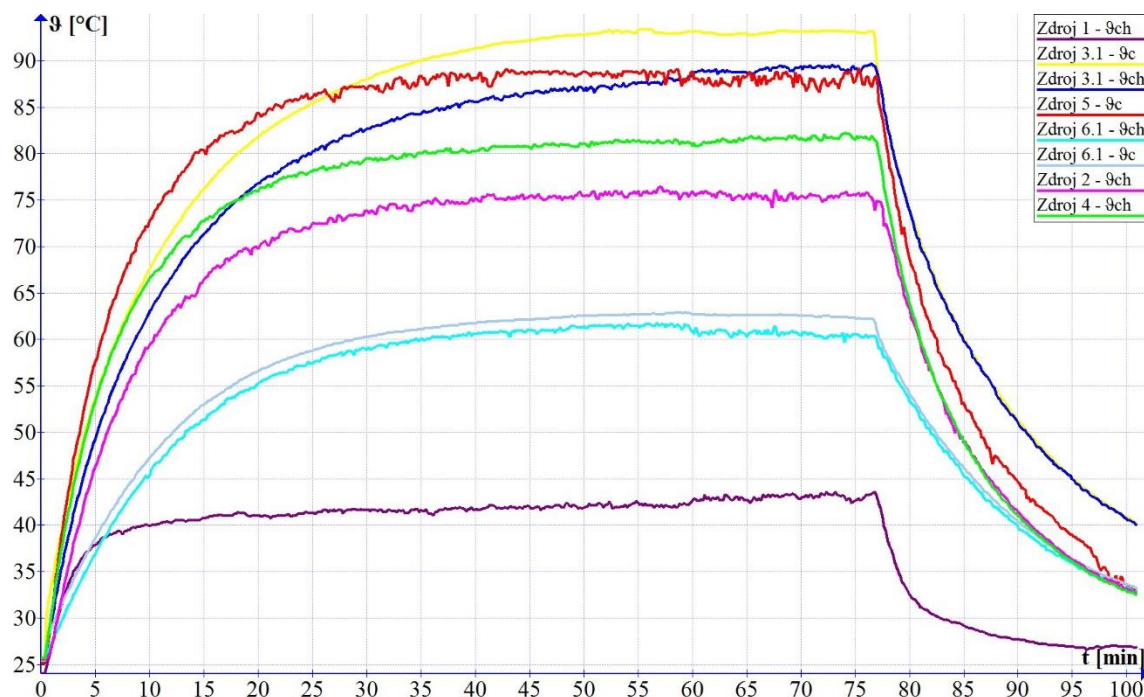


Obrázek 32: Vývoj odebíraného příkonu světelnými zdroji v čase, změřeno programovatelným napájecím zdrojem APT 300XAC

4.5 Teplotní zkouška měřených LED světelných zdrojů

Cílem teplotní zkoušky je zjistit u jednotlivých světelných zdrojů dva základní průběhy. Prvím z nich je průběh teplot v blízkosti samotného LED čipu ϑ_c a v několika bodech na chladiči LED retrofitu po připojení k napájecímu napětí při běžné teplotě okolí ϑ_0 25 °C. Následně i ochlazovací charakteristiky, které vyjadřují, jak se LED světelný zdroj ochlazuje po odpojení od napájecího napětí. Druhým průběhem je vliv zvýšené okolní teploty LED retrofitu na odvod tepla od LED čipu a z chladiče LED retrofitu do okolí.

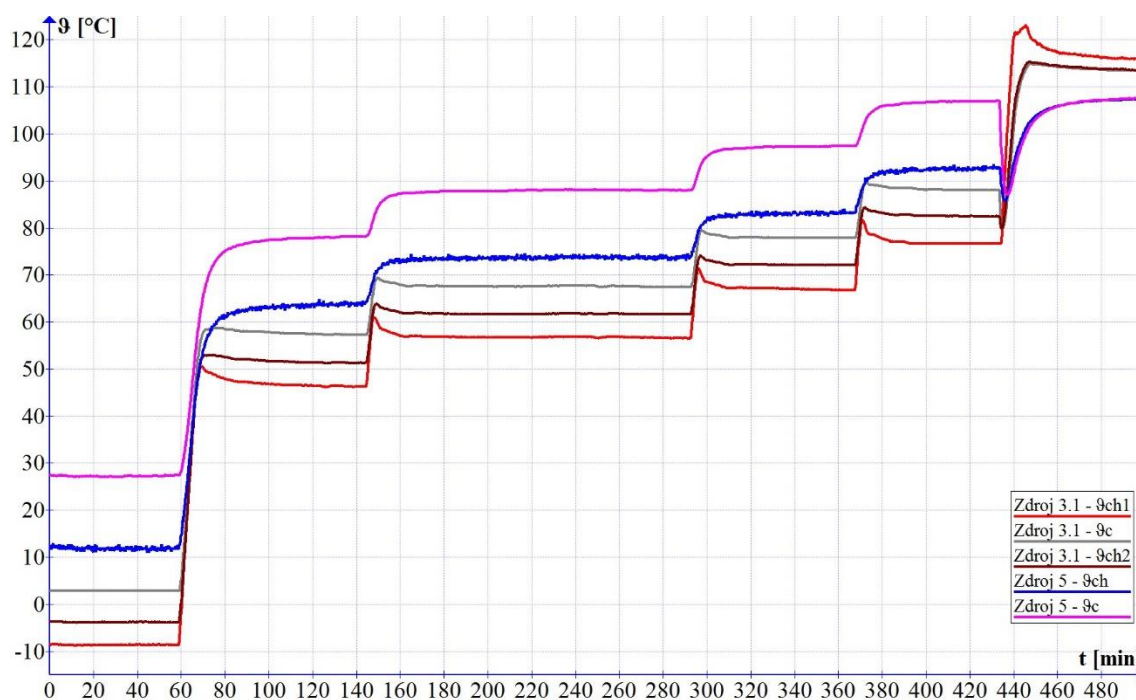
Na obr. 33 jsou znázorněné oteplovací a ochlazovací charakteristiky měřených světelných zdrojů při teplotě okolí ϑ_0 25 °C. Je zde patrné, že mají měřené zdroje konstrukčně vyřešen odvod tepla od LED čipu různě. U zdrojů 1 a 5 dosahuje teplota v blízkosti LED čipu ϑ_c hodnot okolo 90 °C naproti tomu zdroj 6.1 má odvod tepla vyřešen lépe a teplota v blízkosti LED čipu ϑ_c nepřesahuje 65 °C, což je daleko menší teplota než u jiných zdrojů na chladiči. U ostatních zdrojů byla teplota vzhledem ke konstrukci měřena pouze na chladiči ϑ_{ch} . Například zdroj 1 tvořila uzavřená baňka, plněná plynem, který je zprostředkovatelem přenosu tepla od samotného LED čipu na tělo baňky a následně do okolí světelného zdroje. Teplota zde byla měřena pouze na povrchu skleněné baňky ϑ_{ch} a nepřesáhla hodnotu 45 °C. Výrazné přehřívání a nedostatečný odvod tepla byl zjištěn u zdroje 3.1. rozdíl teplot v blízkosti LED čipu a na chladiči ϑ_c ϑ_{ch} dosahoval méně než 5 °C a celkově přesahovala teplota v blízkosti čipu ϑ_c přes 90 °C.



Obrázek 33: Průběh teplot v měřených bodech jednotlivých světelných zdrojů při teplotě okolí $\vartheta_0 = 24$ °C, změřeno měřicí ústřednou ALMEMO 5690-2

Toto představuje teplotu na samotném PN přechodu výrazně přes 100 °C. Tak vysoká teplota výrazně zkracuje životnost LED světelného zdroje, což je patrné i z grafu na obr. 16

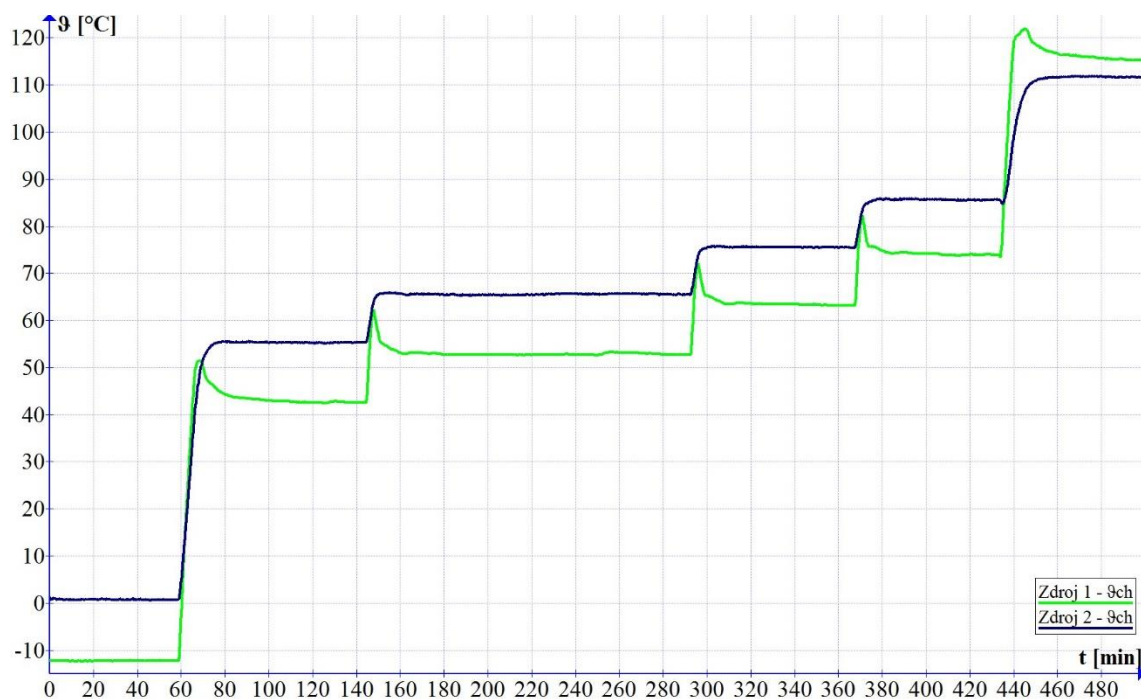
Měření teplotních charakteristik při různých teplotách okolí spočívá v umístění světelného zdroje do teplotní komory a připojení k napájecímu napětí. Teplota byla okolí ϑ_o byla postupně zvyšována z hodnoty -15 °C na 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C. Mezi zvyšováním teploty okolí byl ponechán čas na ustálení teplot v měřených bodech. V posledním kroku byly světelné zdroje odpojeny od napájení a teplota v teplotní komoře ϑ_o byla zvýšena na 120 °C. V grafech na obr. 34, 35 a 36 je vidět, jaký má vliv odstranění zdroje tepla v podobě LED čipu a jak některé teploty prudce klesají. Graf na obr. 34 ukazuje světelné zdroje 3.1 a 5, měřené ve třech a dvou bodech. Z měření vyplývá, že ustálené teploty v několika bodech na těchto dvou zdrojích jsou pouze posunuté o určitou teplotu bez žádného vlivu na průběh. Rozdíl se projevuje pouze při změně teploty během přechodného děje než se teploty ustálí.



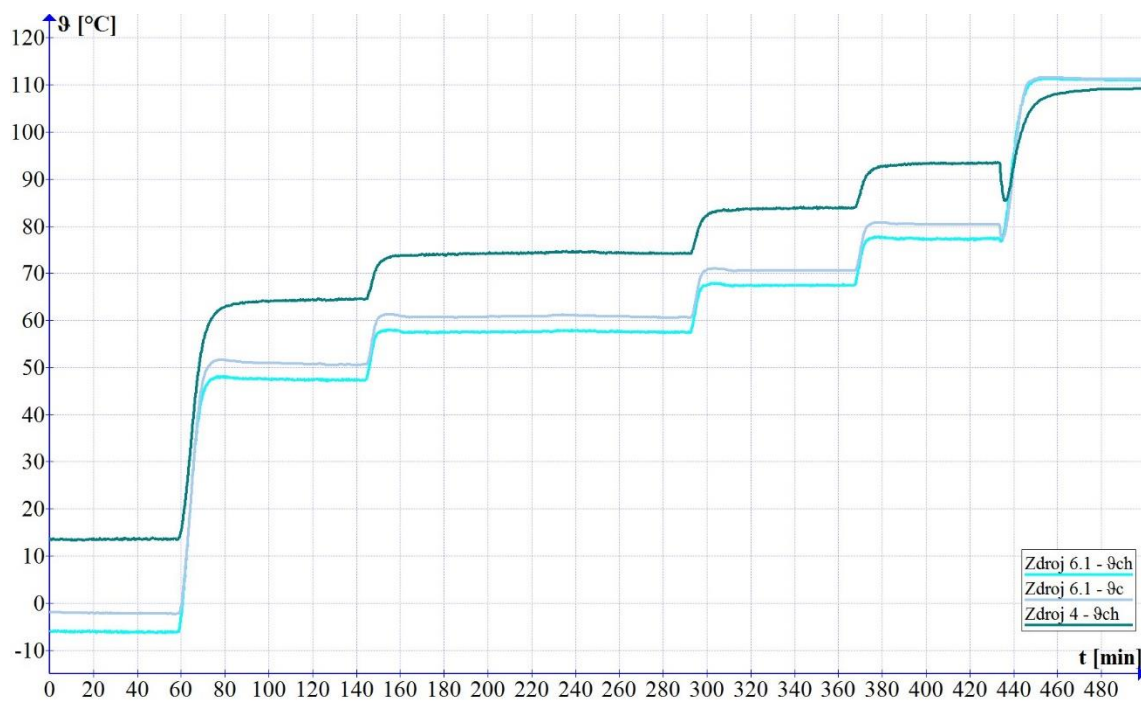
Obrázek 34: Průběh teplot v měřených bodech světelných zdrojů 3.1 a 5 při teplotách okolí $\vartheta_o = -15, 50, 60, 70, 80, 120$ °C, změřeno měřicí ústřednou ALMEMO 5690-2

V případě grafu na obr. 35 je patrný rozdíl mezi měřením teploty ϑ_{ch} přímo na masivním kovovém chladiči v případě zdroje 2 a měřením teploty ϑ_{ch} na skleněné baňce v případě zdroje 1. Stejně jako u obr. 34, tak i v grafu na obr. 36 je patrný konstantní rozdíl mezi teplotou měřenou v blízkosti LED čipu ϑ_c a teplotou na chladiči ϑ_{ch} . V tomto případě u zdroje 6.1 je vidět lepší odvod tepla od LED čipu protože rozdíl zmíněných teplot je minimální, přibližně 2 °C. Zdroj 5 byl během

teplotních zkoušek poškozen tak, že už se nerozsvítil, po hledání závady bylo zjištěno, že byl poškozen napájecí zdroj.



Obrázek 35: Průběh teplot v měřených bodech světelných zdrojů 1 a 2 při teplotách okolí $\theta_o = -15, 50, 60, 70, 80, 120^{\circ}\text{C}$, změřeno měřicí ústřednou ALMEMO 5690-2

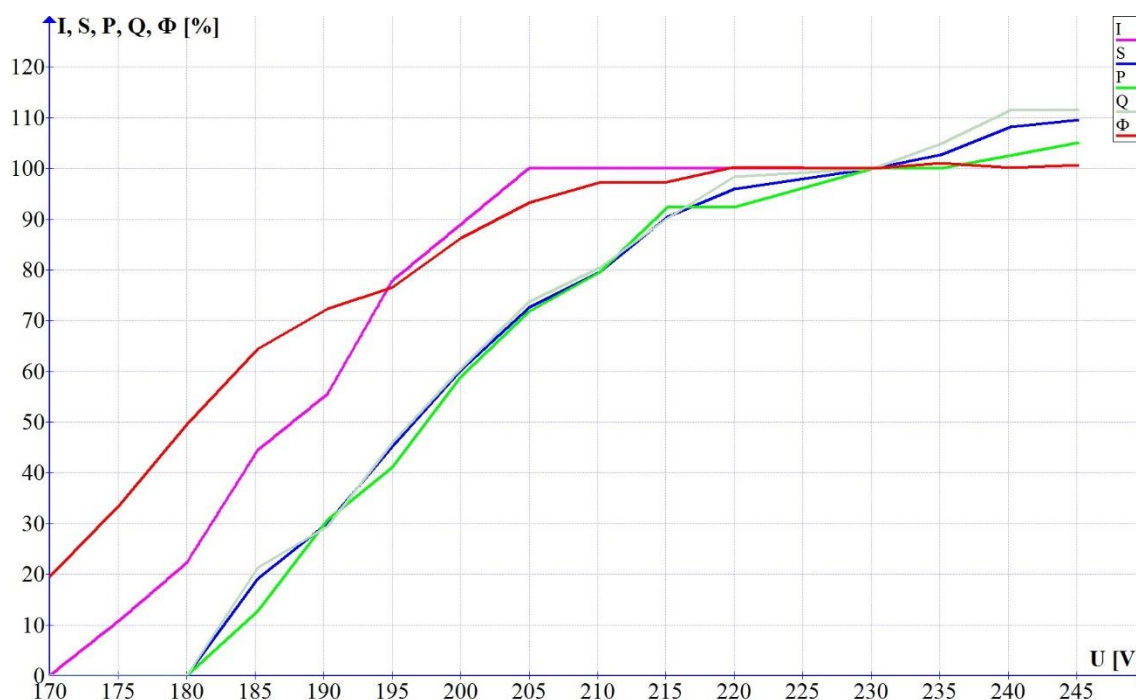


Obrázek 36: Průběh teplot v měřených bodech světelných zdrojů 6.1 a 4 při teplotách okolí $\theta_o = -15, 50, 60, 70, 80, 120^{\circ}\text{C}$, změřeno měřicí ústřednou ALMEMO 5690-2

4.6 Závislost parametrů LED světelných zdrojů na napájecím napětí

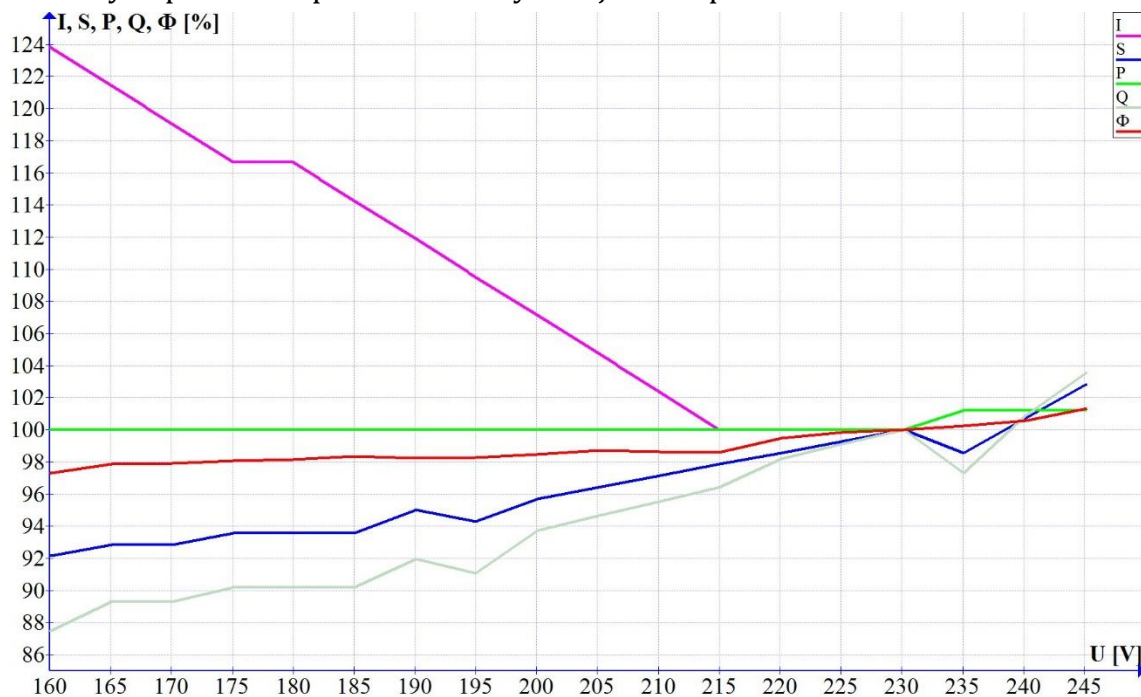
Závislosti ostatních parametrů na napájecím napětí se u světelných zdrojů vyjadřuje ve formě křížových charakteristik. Napěťové závislosti se zpravidla měří v rozsahu napětí 170 V – 240 V, zabývají se tedy oblastí okolo běžného napětí rozvodné sítě 230 V. Díky křížovým charakteristikám lze simulovat, co se se světelným zdrojem a jeho parametry děje v případě, že v elektrické síti dojde k podpětí nebo k přepětí. V případě LED retrofitů, které obsahují napájecí zdroj pro LED čip, zpravidla spínaný zdroj, jsou křížové charakteristiky prověřeny hlavně tohoto napájecího zdroje a jeho chování. Z důvodu nutnosti vyjádření všech parametrů jednoho světelného zdroje do stejného grafu je nutné parametry normalizovat a vynášet v procentech. Pro hodnoty veličin, které odpovídají 230 V je stanovena pro veličiny hodnota 100 %. Do křížových charakteristik byly v závislosti na napětí vynášeny následující veličiny: napájecí proud I (%), zdánlivý výkon S (%), činný výkon P (%), jalový výkon Q (%) a světelný tok Φ (%).

V naprosté většině případů je v grafech na obr. 38, 39, 40, 41 a 42 vidět, že se snižujícím se napájecím napětím klesají i ostatní sledované veličiny kromě napájecího proudu I , který naopak stoupá. Jedinou výjimkou je zdroj 1, u kterého je v grafu na obr. 37 vidět, že s poklesem napájecího napětí klesají všechny sledované veličiny včetně napájecího proudu I .

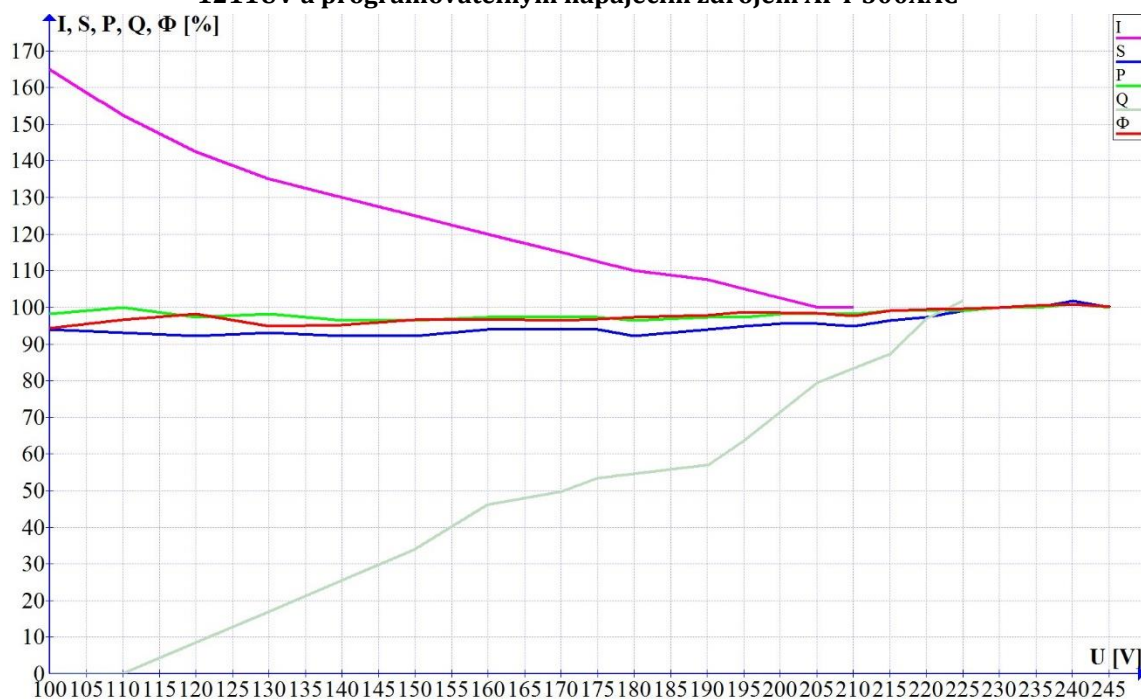


Obrázek 37: Křížové charakteristiky zdroje 1 změřené spektrometrem JETI specbos 1211UV a programovatelným napájecím zdrojem APT 300XAC

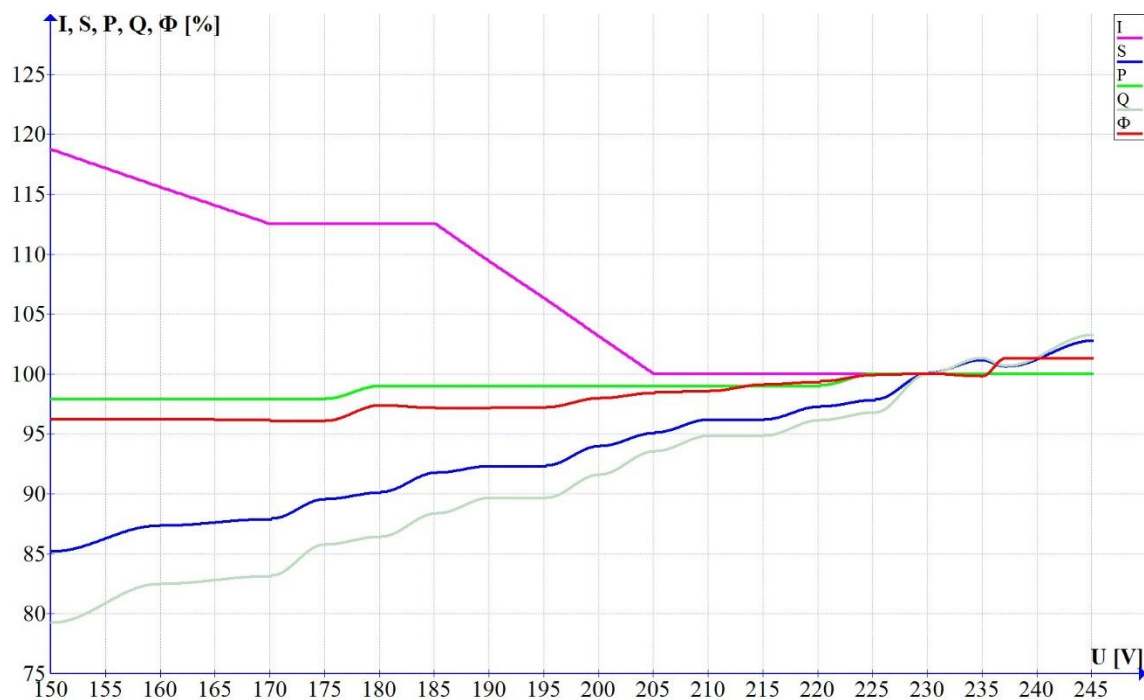
Ve většině případů je rovněž v grafech patrná korelace mezi zdánlivým výkonem S a jalovým výkonem Q nebo mezi činným výkonem P a světelným tokem Φ , což je nejvíce pozorovatelné v grafech na obr. 38, 40 a 41. Ani jeden z měřených vzorků LED retrofitů nebyl typ určený ke stmívání, takže ve většině případů po podkročení hodnoty napětí 150 V přestal světelný zdroj svítit úplně.



Obrázek 38: Křížové charakteristiky zdroje 2 změřené spektrometrem JETI specbos 1211UV a programovatelným napájecím zdrojem APT 300XAC



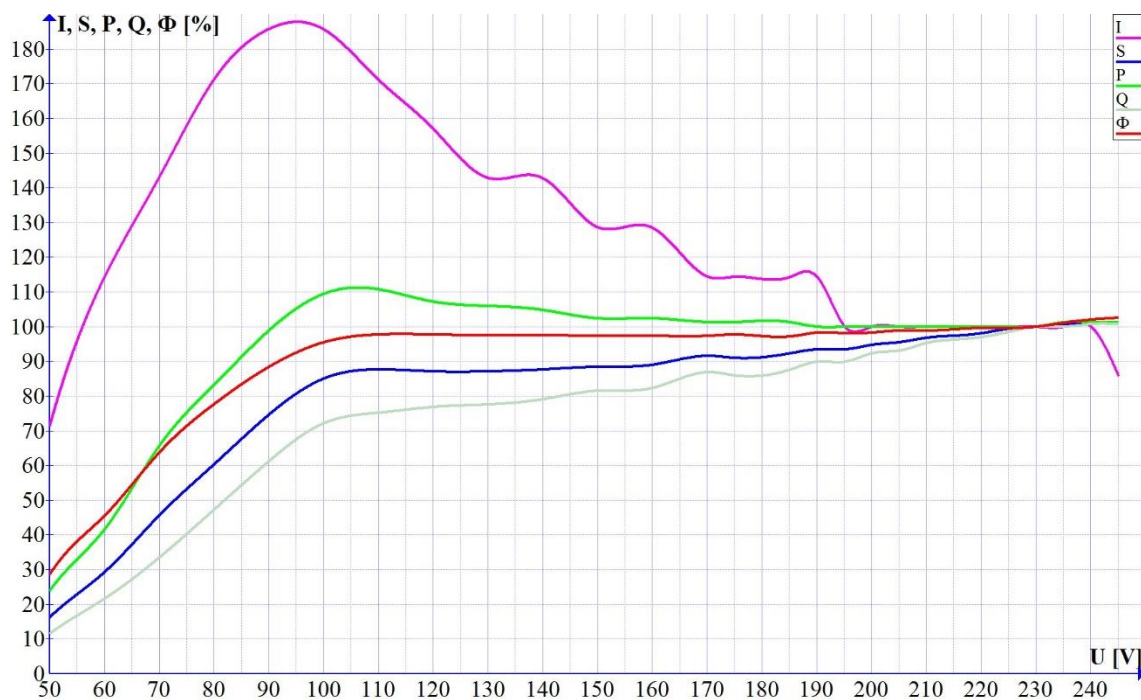
Obrázek 39: Křížové charakteristiky zdroje 3.1 změřené spektrometrem JETI specbos 1211UV a programovatelným napájecím zdrojem APT 300XAC



Obrázek 40: Křížové charakteristiky zdroje 5 změřené spektrometrem JETI specbos 1211UV a programovatelným napájecím zdrojem APT 300XAC



Obrázek 41: Křížové charakteristiky zdroje 6.1 změřené spektrometrem JETI specbos 1211UV a programovatelným napájecím zdrojem APT 300XAC



Obrázek 42: Křížové charakteristiky zdroje 7 změřené spektrometrem JETI specbos 1211UV a programovatelným napájecím zdrojem APT 300XAC

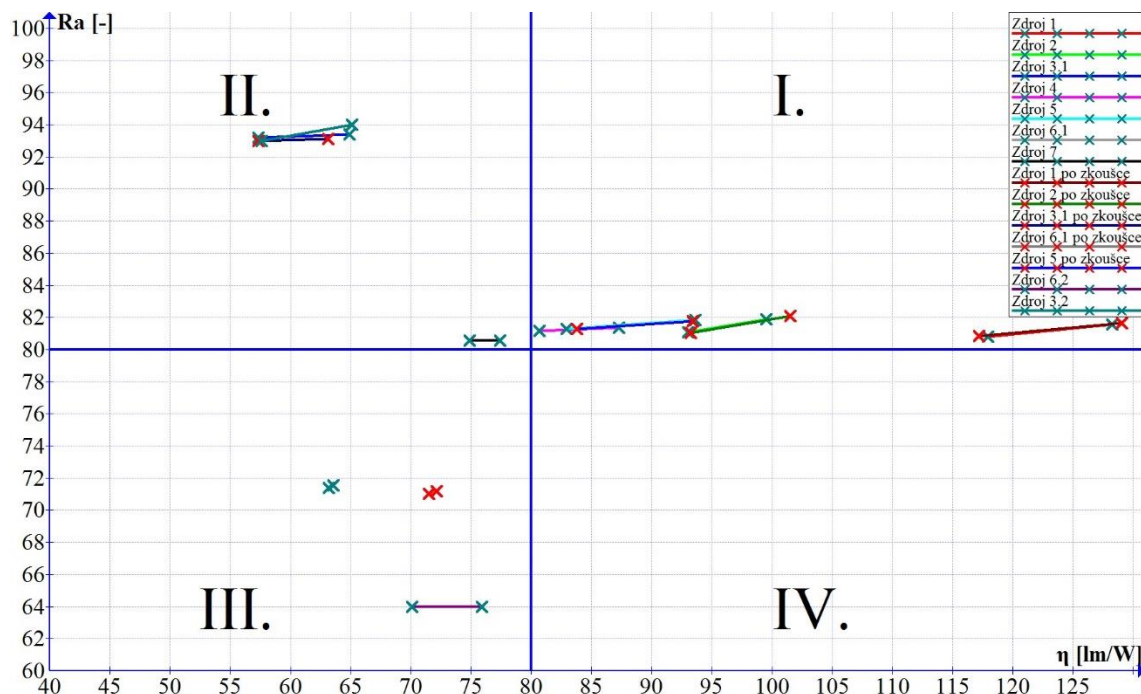
4.7 Srovnání změřených parametrů s parametry výrobců

Často se stává, že v zájmu zvýšení prodejnosti neuvádějí výrobci na své výrobky pravdivé údaje nebo uvádějí údaje neúplné. Cílem této kapitoly je srovnat hodnoty, které vyly u vzorků naměřeny s tím, co výrobci uvádějí.

Prvním srovnáním, které srovnává měřené světelné zdroje mezi sebou je graf na obr. 43, který porovnává světelné zdroje z hlediska energetického ve formě měrného světelného výkonu η (lm/W) a z hlediska kvality vyzařovaného světla ve formě indexu barevného podání Ra (-). Graf byl rozdělen na čtyři kvadranty v hodnotách $\eta = 80$ lm/W protože je to při dnešním vývoji nejnižší obvyklá hodnota měrného světelného výkonu. Další rozdělení je v hodnotě $Ra = 80$ protože je to hygienicky stanovené minimum, pod které by se s hodnotou indexu barevného podání neměl žádný světelný zdroj dostat. Do grafu byly pro každý měřený světelný zdroj zaneseny naměřené hodnoty vždy po připojení k napájecímu napětí a po ustálení hodnot a tyto dvě hodnoty pro každý světelný zdroj byly spojeny přímkou.

Pro každý měřený světelný zdroj byly vyneseny hodnoty jak před tepelnou zkouškou, tak po ní, takže jsou v grafu vidět i případné rozdíly. V I. kvadrantu jsou světelné zdroje s nejlepšími výsledky. Do II. kvadrantu spadají světelné zdroje, které mají sice dobré světelné vlastnosti, ale mají relativně vysokou spotřebu. Světelné zdroje ve III kvadrantu dopadly špatně v obou kategoriích a není dobré si takové

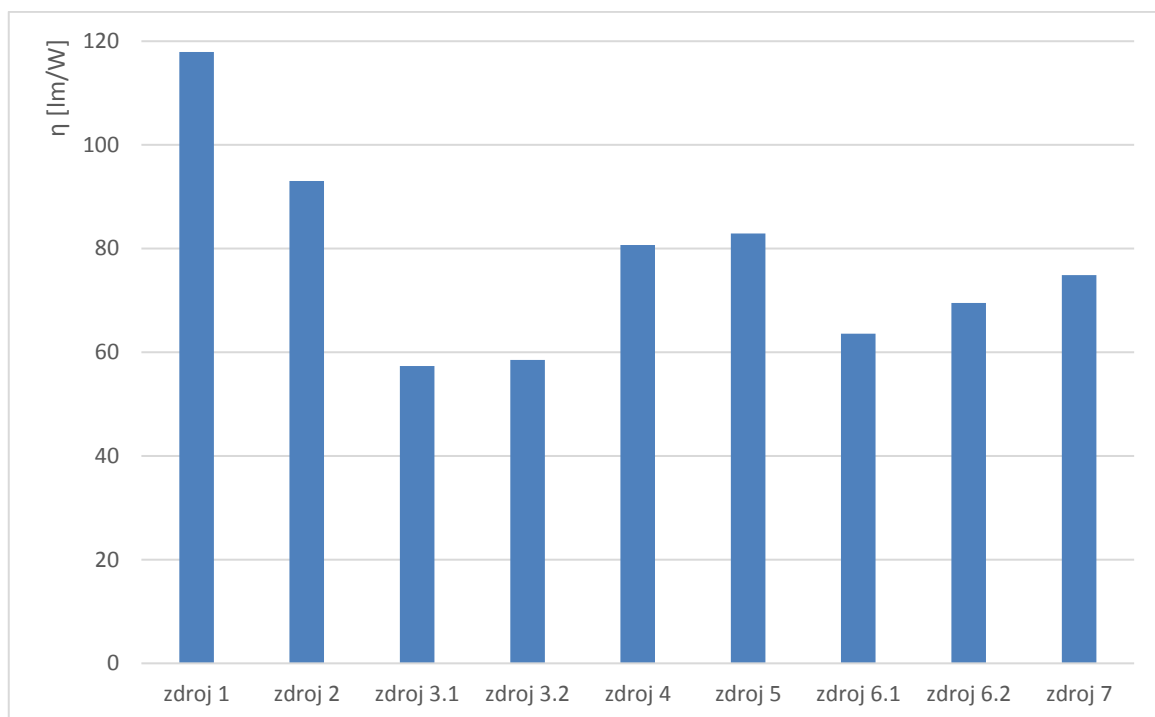
světelné zdroje pořizovat a v posledním IV. Kvadrantu jsou sice úsporné světelné zdroje, ale mají špatné světelné parametry.



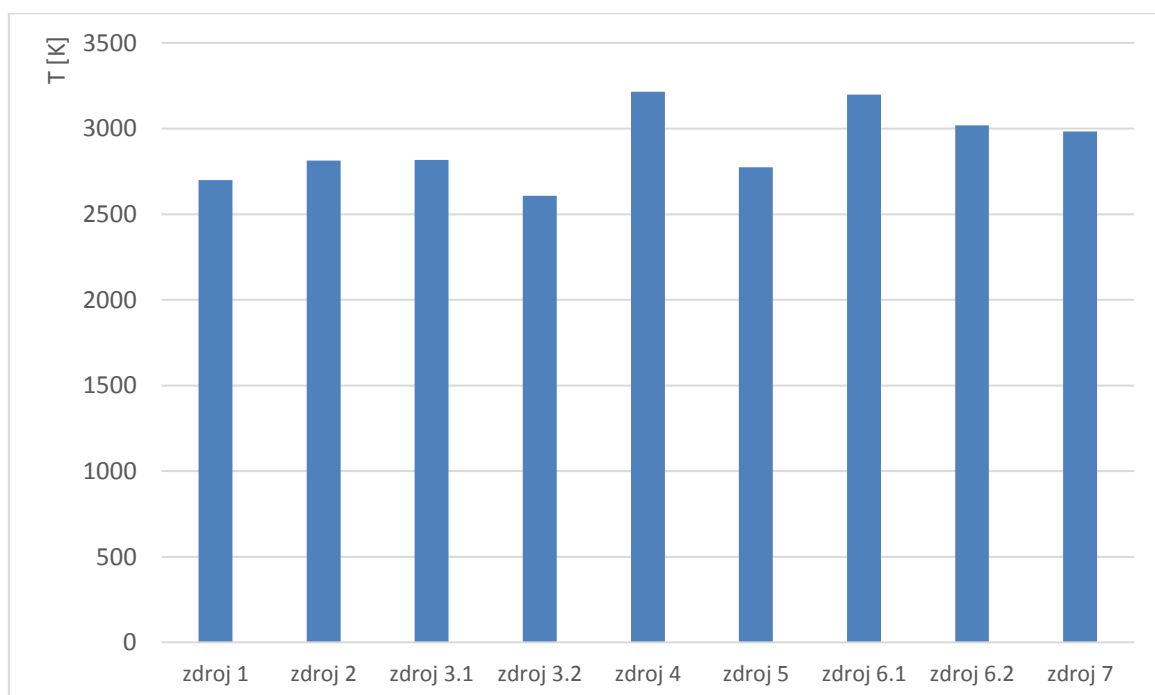
Obrázek 43: Hodnocení měřených světelných zdrojů z pohledu indexu barevného podání a měrného světelného výkonu se zohledněním ustálení parametrů po připojení k napájení.

V následujících grafech na obr. 44 a 45 jsou srovnány hodnoty měrného světelného výkonu η a teploty chromatičnosti T jednotlivých světelných zdrojů. Jak vyplývá z grafů, zdroje 3.1 a 3.2 mají nejméně účinnou přeměnu elektrické energie na světelnou, následují zdroje 6.1 a 6.2. Oproti tom nejúčinnější přeměna energie nastává ve zdrojích 1 a 2.

Z pohledu teploty chromatičnosti se dají všechny měřené vzorky zařadit mezi tzv. teple bílé. Nejtepleji působí zdroje s nejnižší teplotou chromatičnosti T , tj. zdroj 3.2 a zdroj 1. Nejvyšší teplotu chromatičnosti T při měření vykazovaly zdroje 4 a 6.1



Obrázek 44: Srovnání měrných světelných výkonů měřených světelných zdrojů



Obrázek 45: Srovnání teploty chromatičnosti měřených světelných zdrojů

Tabulka 3: Vybrané změřené a deklarované parametry pro zdroje 1, 2, 3.1 a 3.2

	zdroj 1		zdroj 2		zdroj 3.1		zdroj 3.2	
	měřeno	deklar.	měření	deklar.	měření	deklar.	měření	deklar.
ϕ [lm]	448,1	420	735	806	596,5	600	602,3	600
η [lm/W]	117,9	-	93,03	-	57,35	54	57,59	54
T [K]	2700	2700	2813	2700	2816	2700	2708	2700
Ra [-]	80,8	>80	81,07	80	93,2	>87	93	>87
U [V]	230,2	220 - 240	230,2	220 - 240	230,2	220 - 240	230,2	220 - 240
P [W]	3,8	4	7,9	8	10,4	11	10,9	11
životnost [h]	-	20000	-	15000	-	25000	-	25000
úhel svitu [°]	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabulka 4: Vybrané změřené a deklarované parametry pro zdroje 4, 5, 6.1 a 7

	zdroj 4		zdroj 5		zdroj 6.1		zdroj 7	
	měřeno	deklar.	měření	deklar.	měření	deklar.	měření	deklar.
ϕ [lm]	693,9	720	738,1	806	356,1	400	599,1	650
η [lm/W]	80,67	-	82,93	-	82,93	-	74,89	-
T [K]	3515	3000	2773	2700	3119	3500	2983	2800 - 3100
Ra [-]	81,15	>80	81,29	>80	81,29	>80	80,57	>80
U [V]	230,2	230	230,2	220 - 240	230,2	100 - 220	230,2	230
P [W]	8,6	9	8,9	10	5,6	5	8,0	8
životnost [h]	-	25000	-	20000	-	50000	-	30000
úhel svitu [°]	-	-	-	-	-	-	-	270

V tab 3 a 4 jsou porovnány parametry výrobců s parametry, které byly změřeny. Je zde vidět, že výrobci nejsou jednotní v uváděných parametrech a každý si na své výrobky uvádí jiné parametry. Například měrný světelný výkon, který je hodně důležitým parametrem pro výběr světelného zdroje má na výrobku uveden jen jeden výrobce. Na základě porovnání uvedených a změřených parametrů lze tvrdit, že parametry, které výrobci na své výrobky uvedli byly měřením potvrzeny.

V tab. 5 je uveden přehled použitých měřicích přístrojů.

5 DISKUZE VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

I přesto, že byly zvoleny různé typy LED retrofitů s různými typy použitých LED modulů a různé konstrukce, byly parametry měřeny takovým způsobem, aby mohly být porovnávány. Z pohledu spektra obstály v teplotní zkoušce vzorky 1, 2, 2,1 a 5, které po teplotní zkoušce nevykazovaly téměř žádné rozdíly, naopak velmi poškozeny byly vzorky 3.2, 6.1 a 6.2. Vzorek 5 se po teplotní zkoušce ani nerozsvítil, došlo k poškození napájecího zdroje teplem. Vzhledem k dostupnému vybavení nebylo možné změřit světelně technické parametry v závislosti na teplotě ale pouze před a po teplotní zkoušce.

Světelně-technické parametry se po teplotní zkoušce lišily pouze v konkrétních jednotlivých případech, nelze tvrdit, že by došlo ke změně u všech měřených vzorků. Parametry, vyjadřující kvalitu vyzařovaného světla se výrazně nelišily od údajů, které uvádí výrobce. Teplota chromatičnosti T se u vzorků pohybovala v rozmezí 2600 – 3200 K. Index barevného Ra větší než 80, jak ukládá norma splňují všechny měřené vzorky až na zdroje 6.1 a 6.2, u kterých se hodnota pohybovala okolo 71, u dvou vzorků dosahovala hodnoty 93 a to u zdrojů 3.1 a 3.2.

Z hlediska účinnosti lze jako nejlepší hodnotit pouze zdroje 1 a 2. Měrný světelný výkon η u nich dosahoval hodnot 117 lm/W a 93 lm/W. Naopak zdroje s nejhoršími výsledky dosahovaly hodnot měrného světelného výkonu η pouze 57 lm/W nebo 63 lm/W a to u vzorků 3.1, 3.2 a 6.1.

U závislostí parametrů na napětí nenastal podle měření v okolí pracovního bodu 230 V žádný problém napájecí zdroje LED retrofitů se dokážou přizpůsobit kolísání napětí v síti bez poškození světelného zdroje. Při poklesu napájecího napětí pod 220 V klesají i ostatní parametry, kromě odebíraného proudu, který klesá jen u zdroje 1 a v ostatních případech stoupá.

Z oteplovacích charakteristik během teplotní zkoušky vyplývá, že se po ustálení liší teploty v jednotlivých bodech ϑ_c , ϑ_{ch} v rámci jednoho měřeného zdroje o konstantní hodnotu v řádu jednotek °C. Je to mimo jiné dáno konstantním příspěvkem tepla od samotného LED čipu, který je v průběhu měření připojen k napájení.

Tabulka 5: Seznam měřicích přístrojů včetně specifikace

Měřicí přístroj	Sériové číslo	Mezní odchylka přístroje
Spektroradiometr JETI specbos 1211UV s kulovým integrátorem	2015926	$u_k = 2,4 \%$
Měřicí ústředna ALMEMO 5690-2	25193	$\pm 0,5K$
Programovatelný zdroj APT 300XAC	EA 28358	U - $\pm(1 \%$ of rdg + 2counts) I - $\pm(2 \%$ of set + 2counts) P - $\pm(2 \%$ of rdg + 10counts)

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo seznámit se se základními fotometrickými veličinami a způsobem jejich měření. Dále bylo úkolem obeznámit se s principem funkce a různými typy technologií a konstrukcí LED světelných zdrojů. Byl vypracován přehled provozních parametrů, na základě kterých je možné světelné zdroje mezi sebou porovnávat.

Na základě přehledu parametrů světelných zdrojů bylo s ohledem na časovou náročnost měření a hlavně s ohledem na dostupnou měřicí techniku na UAMT a UEEN stanoven seznam parametrů, které se budou u daných vzorků měřit a následně porovnávat. Měřené parametry byly voleny i s ohledem na možnost srovnání měřených parametrů s parametry, které udává na svých produktech výrobce. Mezi hlavní měřené světelně-technické parametry patřil světelný tok, teplota chromatičnosti a ostatní barevné vlastnosti vyzařovaného světla. Mezi nejdůležitější elektrické parametry patřilo napětí, proud, činný jalový a zdánlivý výkon a celkový účinník. Všechna tato měření probíhala podle navrženého měřicího řetězce na UEEN na poloautomatizovaném pracovišti. Pro určení vlivu různého napájecího napětí na LED retrofit byly měřeny křížové charakteristiky, které tyto závislosti ostatních parametrů na napájecím napětí vyjadřují.

Po ověření parametrů nových světelných zdrojů, byly tyto světelné zdroje podrobeny v tepelné komoře na UAMT tepelné zkoušce podle navrženého měřicího řetězce. Jejím cílem bylo jednak prověřit teplotní charakteristiky jednotlivých zdrojů a způsoby, jakým je od LED čipů odváděno teplo, jednak také vystavení celého LED retrofitu vysoké teplotě, při které se mohou jednotlivé části vzorku částečně nebo zcela poškodit.

Po tepelné zkoušce byly stejným způsobem změřeny všechny světelně-technické a elektrické parametry v laboratoři na UEEN, aby mohly být porovnány.

Výsledkem práce je srovnání změřených parametrů s parametry výrobců, které jsou po porovnání velmi podobné. Dalším výsledkem je porovnání měřených LED retrofitů mezi sebou jak v oblasti kvality vyzařovaného světla (R_a , T), tak z pohledu elektrických parametrů a účinnosti. Světelné zdroje byly voleny záměrně hodně různorodě, aby se mohly srovnávat výrobky různých typů. Bylo dosaženo očekávaných výsledků v případě dlouhodobého vystavování měřených světelných zdrojů vysokým teplotám se předpokládá, že by se poškození projevilo více.

Literatura

- [1] BAXANT, P. *Světelná technika*. Skriptum VUT
- [2] BAXANT, P. DRÁPELA, J. *Užití elektrické energie*. Skriptum VUT 2007
- [3] HABEL, J.: *Základy světelné techniky*. Časopis Světlo. 2008, roč. 10, č. 4, s. 40-41. ISSN 1212-0812
- [4] *Historie LED* [online]. 2015 [cit. 2016-01-05]. Dostupné z: http://www.osram.cz/osram_cz/novinky-a-znalosti/led-domov/technicke-informace/zakladni-prehled-led/historie-led/index.jsp
- [5] *Měření parametrů moderních světelných zdrojů a svítidel* [online]. 2013 [cit. 2015-11-29]. Dostupné z: http://www.elektroatrh.cz/pdf/mereni_parametru_modernich_svetelných_zdroju_a_svitidel.pdf
- [6] ŽÁK, P.: *Trendy ve světelných diodách a svítidlech se světelnými diodami*. Časopis Světlo. 2010 roč. 12, č. 6, s. 16-18. ISSN 1212-0812
- [7] HABEL, J.: *Základy světelné techniky*. Časopis Světlo. 2008, roč. 10, č. 4, s. 40-41. ISSN 1212-0812
- [8] DVOŘÁČEK, V.: *Světelné zdroje – světelné diody*. Časopis Světlo. 2009, roč. 11, č. 5, s. 68-71. ISSN 1212-0812
- [9] HENNING M. A.; SVG-Umsetzung: *Cepheiden – :Datei:Silizium-p-Dotiert.png, GFDL*, [online]. 2016 [cit. 2017-3-29]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10515059>
- [10] MUSIL, V. *Mikroelektronické prvky a struktury*. Skriptum VUT 2014
- [11] MUSIL, V. *Elektronické součástky*, 3. uprav.vyd. Brno: VUTUM, 2000, 222 s. ISBN 80-214-1776-5
- [12] BOUŠEK, J. KOSINA, P. MOJROVÁ, B. *Elektronické součástky*. Skriptum VUT 2015
- [13] DRÁPELA, J., KURSA, M., *Elektrotechnické materiály*, Skriptum VŠB Ostrava, 2012, 439 s
- [14] Rozdiel medzi LED COB a MCOB diódami. *Úsporná žiarovka* [online]. 2015 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://www.uspornaziarovka.sk/forum/wp-content/uploads/2015/06/generacieLEDdiod.jpg>
- [15] BROWN, C. *Comparison And Differences Between LED Technologies: DIP vs. SMD vs. COB vs. MCOB* [online]. 2013 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <https://www.hitlights.com/blog/comparison-and-differences-between-led-technologies-dip-vs-smd-vs-cob-vs-mcob/>
- [16] *The Next Generation of LED Filament Bulbs* [online]. 2015 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: http://www.ledinside.com/knowledge/2015/2/the_next_generation_of_led_filament_bulbs

- [17] *COB LED od Seoul Semiconductor*. Časopis Světlo. 2012 roč. 15, č. 3, s. 32. ISSN 1212-0812 .
- [18] FENG, W. et al. *Simulation and optimization on thermal performance of LED filament light bulb*. 2015 12th China International Forum on Solid State Lighting (SSLCHINA), Shenzhen, 2015, pp. 88-92. dostupné z <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7360696&isnumber=7360671>
- [19] *Odolnost LED proti vlivům prostředí* [online]. 2016 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://www.wireliled.cz/aplikacni-poznamky/odolnost-led-prostredi/>
- [20] *Energy gostaran* [online]. 2015 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://energygostaran.com/?product=candel>
- [21] *Konstrukce LED žárovky* [online]. 2015 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://eshop.elkolighting.cz/dokument/co-je-LED>
- [22] DVOŘÁČEK, V.: *Světelné zdroje – světelné diody*. Časopis Světlo. 2009, roč. 12, č. 5, s. 68-71. ISSN 1212-0812
- [23] *Seriál LED osvětlení, 2. díl – Chlazení LED* [online]. 2013 [cit. 2016-10-10]. Dostupné z: <http://www.afimocz.cz/serial-led-osvetleni-2-dil-chlazen-led/>
- [24] *Seriál LED osvětlení, 3. díl – LED drivery* [online]. 2013 [cit. 2016-10-10]. Dostupné z: <http://www.afimocz.cz/serial-led-osvetleni-3-dil-led-drivery/>
- [25] *LEDs and AC Power* [online]. 2013 [cit. 2016-10-10]. Dostupné z: <http://www.statelineeco.com/led-education/led-ac-power.html>

Seznam příloh

Příloha 1. CD s elektronickou verzí práce a tabulkami všech změřených hodnot