

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

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

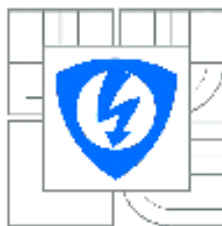
**MĚŘENÍ PROVOZNÍCH PARAMETRŮ
SVĚTELNÝCH ZDROJŮ**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE
AUTHOR**

MARTIN MOTYČKA

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Martin Motyčka
Ročník: 3

ID: 146909
Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Měření provozních parametrů světelných zdrojů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Parametry světelných zdrojů (dělení, rozsahy,...)
2. Způsob měření elektrických a světelně-technických parametrů
3. Křížové charakteristiky
4. Laboratorní měření provozních parametrů
5. Vyhodnocení laboratorního měření a porovnání naměřených hodnot s katalogovými hodnotami

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 30.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Michal Krbal
Konzultanti bakalářské práce:

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

UPOZORNĚNÍ:

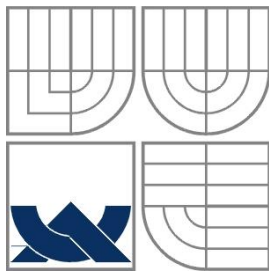
Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných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

Bibliografická citace práce:

MOTYČKA, M. *Měření provozních parametrů světelných zdrojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 69 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Krbal.

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

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Bakalářská práce

Měření provozních parametrů světelných zdrojů

Martin Motyčka

vedoucí: Ing. Michal Krbal

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2014

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering

Bachelor's Thesis

Measurement of Operational Parameters of Light Sources

by

Martin Motyčka

Supervisor: Ing. Michal Krbal

Brno University of Technology, 2014

Brno

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na seznámení se s provozními parametry světelných zdrojů a způsobu jejich měření. Jsou zde popsány jednotlivé světelně-technické, elektrické a ostatní parametry světelných zdrojů, způsoby jejich měření a vyhodnocení. Pro přehlednost jsou vytvořeny tabulky s rozsahy fotometrických veličin jednotlivých světelných zdrojů. Práce je také zaměřena k popisu jednotlivých fotometrických přístrojů a k nastínění principu, na kterém pracují.

KLÍČOVÁ SLOVA: Světelné zdroje; fotometrické veličiny; světelná energie; světelný tok; svítivost; osvětlení; jas; teplota chromatičnosti; náhradní teplota chromatičnosti; index podání barev; CRI; střední doba života; měrný světelný výkon; patice; fotočlánek; fotodioda; kulový integrátor; fotogoniometr; luxmetr

ABSTRACT

This semestral thesis is focused on description of operating parameters of light sources and their measurements. There are described light technical, electrical and other parameters of light sources and methods of their measurements and evaluations. In tables there are ranges of photometric quantities for most types of light sources. This thesis is also focused on functional explanation of photometric measuring instruments..

KEY WORDS:

Light sources; photometry quantity; luminous energy; luminous flux; luminous intensity; illuminance, luminance; chromaticity; color temperature; correlated color temperature; color rendering index; lifetime; specific power; screw base; photometr; photodiode; integrating sphere; photogoniometer; luxmetr;

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	7
SEZNAM TABULEK	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
1 ÚVOD	10
2 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI SVĚTLA.....	11
2.1 VIDITELNÉ SPEKTRUM SVĚTLA	11
2.2 HISTORICKÝ POHLED NA PODSTATU SVĚTLA.....	12
2.3 VZNIK SVĚTELNÉHO ZÁŘENÍ.....	12
2.3.1 PŘÍRODNÍ ZDROJE	12
2.3.2 UMĚLÉ ZDROJE	13
3 PARAMETRY SVĚTELNÝCH ZDROJŮ	14
3.1 SVĚTELNĚ TECHNICKÉ PARAMETRY	14
3.1.1 SVĚTELNÝ TOK	15
3.1.2 SVÍTIVOST	17
3.1.3 OSVĚTLENOST.....	18
3.1.4 JAS	19
3.1.5 SVĚTLENÍ	20
3.1.6 MĚRNÝ SVĚTELNÝ VÝKON	20
3.1.7 TEPLOTA CHROMATIČNOSTI	21
3.1.8 INDEX PODÁNÍ BAREV	22
3.2 ELEKTRICKÉ PARAMETRY	23
3.2.1 ELEKTRICKÝ PŘÍKON	23
3.2.2 NAPÁJENÍ A ODEBÍRANÝ PROUD	24
3.3 OSTATNÍ PARAMETRY.....	27
3.3.1 PATICE	27
3.3.2 STŘEDNÍ DOBA ŽIVOTA ZDROJE	28
4 MĚŘENÍ SVĚTELNĚ-TECHNICKÝCH PARAMETRŮ	30
4.1 FOTOČLÁNKY	30
4.2 MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE.....	33
4.2.1 LUXMETRY	33
4.2.2 JASOMĚRY A JASOVÉ ANALYZÁTORY	34
4.2.3 SPEKTORADIOMETRY.....	35
4.2.4 KULOVÝ INTEGRÁTORY	35
4.2.5 GONIOFOTOMETRY	36
4.2.6 FOTOMETRICKÁ LAVICE	38
5 KŘÍŽOVÉ CHARAKTERISTIKY	39
6 ZÁVĚR.....	40
POUŽITÁ LITERATURA	41
PŘÍLOHA A	45

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 Spektrum viditelného elektromagnetického záření</i>	<i>11</i>
<i>Obrázek 2 Spektrální citlivost lidského oka</i>	<i>11</i>
<i>Obrázek 3 Znázornění prostorového úhlu</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 4 Znázornění definice jasu</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 5 Spektrum bílého světla</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 6 Porovnání indexů podání barev</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 8 Elektronický předřadník pro lineární zářivky</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 7 Halogenová žárovka firmy SilverBullet 20 kW</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 10 Průběh odebíraného proudu kompaktní zářivkou 20 W</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 9 Průběh odebíraného proudu LED zdrojem 8 W</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 12 Liché harmonické složky kompaktní zářivky 20 W s paticí E27</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 11 Liché harmonické složky LED zdroje 8 W</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 13 Patice typu E27</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 14 Bajonetová patice</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 15 Količkové patice</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 16 Závislost životnosti LED na teplotě čipu</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 17 Princip fotodiody</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 18 Spektrální citlivosti hradlových fotočlánků</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 19 Závislost fotoproudu na vnitřním odporu selenového fotočlánku</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 20 Procentuální směrová chyba fotočlánků</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 21 Digitální luxmetr PRC Krochmann 211</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 22 Schéma objektivového jasoměru</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 23 Jasoměr L1009</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 24 Spektroradiometr CS-1000A</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 25 Kulový integrátor</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 26 Křivka svítivosti vyznačená v polorovině fotometrického prostoru</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 27 Systém rovin C-γ</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 28 Izokandelový diagram v sinusoidálním zobrazení</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 29 Fotometrická lavice</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 30 Křížová charakteristika LED diody Nichia NGPLR70</i>	<i>39</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Barevné tóny.....</i>	<i>12</i>
<i>Tabulka 2 Radiometrické veličiny.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabulka 3 Přehled fotometrických veličin.....</i>	<i>15</i>
<i>Tabulka 4 Příklady velikosti osvětlení přírodními zdroji.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabulka 5 Měrný světelný výkon jednotlivých typů světelných zdrojů.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabulka 6 Teplota chromatičnosti světelných zdrojů.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabulka 7 Přehled indexů podání barev různých světelných zdrojů.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabulka 8 Jmenovité příkony jednotlivých typů světelných zdrojů.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabulka 9 Životnost jednotlivých typů světelných zdrojů.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabulka 10 Rozdělení luxmetrů podle přesnosti.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabulka 11 Minimální počet měření v systému C-γ.....</i>	<i>37</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly	Význam
ϕ	Světelný tok
λ	Vlnová délka
Ω	Prostorový úhel
η	Měrný výkon
K	Účinnost světelného záření
I	Svítivost
E	Intenzita osvětlení
L	Jas
M	Světlení
T_c	Náhradní teplota chromatičnosti
R_a	Index podání barev
f	Frekvence

Zkratky	Význam
LED	Light Emitting Diode - svítivá dioda
UV	Ultra Violet, ultra fialová oblast spektra
THD	The harmonic distortion - celkové harmonické zkreslení
EMC	Elektromagnetická kompatibilita

1 ÚVOD

Vynález žárovky se dá považovat za jeden z nejdůležitějších vynálezů novodobých dějin. V minulosti vznikalo mnoho plynáren jen za účelem veřejného osvětlení. S nástupem elektrického osvětlení proběhla průmyslová revoluce. V továrnách se mohl zavést vícesměnný provoz a již nebylo podmínkou přítomnost denního osvětlení. To vše ovlivnilo celkovou produkci průmyslu a dalo podnět k dalšímu rozvoji světelných zdrojů.

Dnes se podílí spotřeba elektrické energie na osvětlení na bezmála 20% celkové vyrobené energie. To má za následek zvyšování požadavků jak na kvalitu světelných zdrojů, tak i na jejich účinnost přeměny světelné energie. Dnešní světelné zdroje dosahují v nejlepším případě účinnosti kolem 30%. Zvyšující se konkurence nutí výrobce vyvíjet zdroje s delší životností, lepší světelnou účinností a indexem podání barev. Ve výsledku je vždy nutný kompromis mezi kvalitativními požadavky na osvětlení, světelnou účinností daného světelného zdroje a pořizovacími náklady.

S rostoucím množstvím různých světelných technologií nastávají i razantní změny ve světelně-technické normalizaci. Klasické žárovky vymizely z obchodů kvůli jejich nedostatečné světelné účinnosti a další světelné zdroje mohou být v budoucnosti zakázány kvůli zvyšujícím se nárokům na průběh odebíraného proudu. Nároky na světelnou účinnost se budou nadále zvyšovat a výrobcům tedy nezbývá, než zastaralé světelné zdroje inovovat pomocí nových materiálů nebo vyvíjet naprosto nové světelné zdroje.

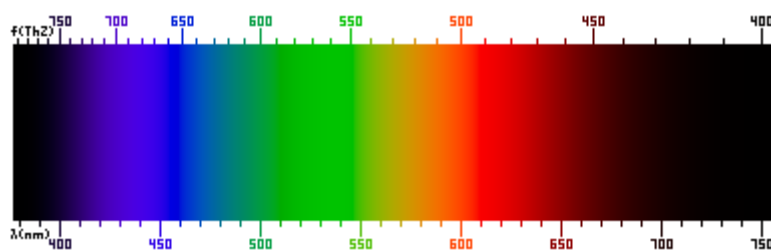
V poslední době se rychle vyvíjejí LED světelné zdroje, které jsou malé, mají dobrou světelnou účinnost a index podání barev. Navíc mají dlouhou životnost, rychlý náběh a podporují možnost stmívání. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady, malé výkony a nároky na chlazení. V nejbližší budoucnosti lze očekávat snižování pořizovacích nákladů a zvyšování výkonu, až budou plně konkurenční dnešním úsporným zářivkám.

Tato práce je zaměřena na seznámení se s používanými provozními parametry u různých druhů světelných zdrojů, jejich celkovým porovnáním a dále na způsobu jejich měření v praxi. V laboratorních podmínkách budou jednotlivé provozní parametry změřeny na různých napájecích hladinách a porovnány s nominální hodnotou. Dále budou proměřeny a porovnány průběhy odebíraných proudů vybraných několika typů světelných zdrojů.

2 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI SVĚTLA

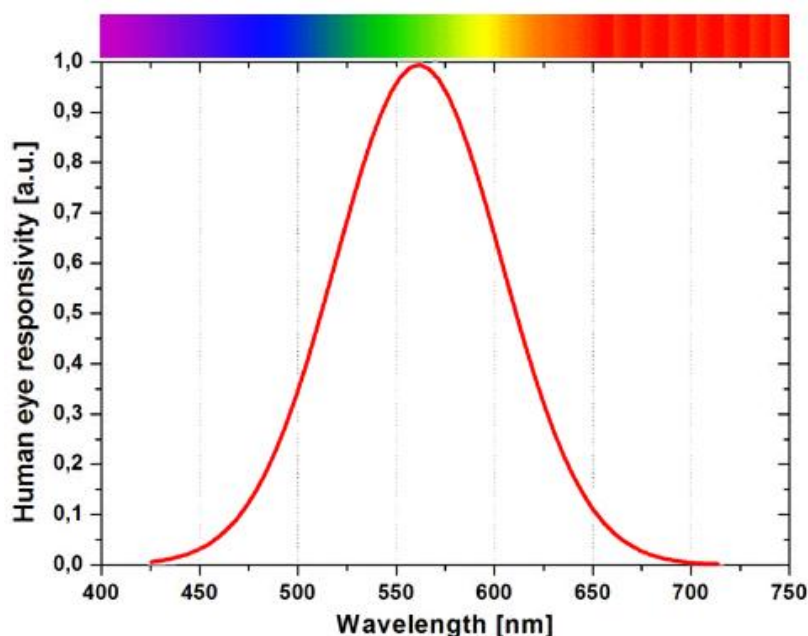
2.1 Viditelné spektrum světla

Elektromagnetické spektrum je rozděleno podle vlnové délky na tyto jednotlivé spektra: krátkovlnné gama záření, rentgenové záření, ultrafialové záření, viditelné záření, infračervené záření, mikrovlnné záření a spektrum rádiových vln. Optické (viditelné) záření tvoří jen malou část elektromagnetického spektra o vlnové délce v rozmezí $\lambda = 380 - 780$ nm. Ultrafialové záření má vlnovou v rozmezí $\lambda = 100 - 380$ nm a infračervené světlo v rozmezí $\lambda = 780 - 10^4$ nm. Na obrázku č.1 je zobrazeno spektrum viditelného spektra elektromagnetického záření [1].



Obrázek 1 Spektrum viditelného elektromagnetického záření [2]

Lidské oko je schopno rozeznat pouze tuto část elektromagnetického spektra, protože naše Slunce vyzařuje světlo o největší intenzitě při vlnové délce $\lambda = 555$ nm a během fyziologického vývoje člověka se přizpůsobila citlivost lidského zrakového orgánu svoji právě této vlnové délce a jejímu okolí. Na obrázku č.3 je znázorněna spektrální citlivost lidského oka. Tato křivka se ve fotometrii označuje $V(\lambda)$ [1].



Obrázek 2 Spektrální citlivost lidského oka [3]

Každá vlnová délka budí určitý barevný počitek, který nazýváme barevným tónem (odstínem). V tabulce č.1 jsou znázorněny jednotlivé barevné tóny a jejich rozmezí vlnových délek.

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

Tabulka 1 Barevné tóny [1]

2.2 Historický pohled na podstatu světla

Během historického vývoje se světlo posuzovalo mnoha způsoby. Isaac Newton přišel s myšlenkou korpuskulární podstaty světla. To znamená, že světlo je tvořeno proudem hmotných částic a světelný paprsek tvoří dráhu ve tvaru přímky, po které se tyto světelné částice pohybují.

Po Newtonovi přišel Christian Huygens, který tvrdil, že světlo je druh postupného vlnění. Tuto teorii potvrdil James C. Maxwell, který dokázal, že světlo je elektromagnetické vlnění určitého spektra. Jeho rovnice ovšem nedokázaly vysvětlit fotoelektrický jev.

Tímto problémem se zabýval i německý fyzik Max Planck, který byl názoru, že těleso o určité teplotě vyzařuje elektromagnetické záření o diskretních hodnotách, které nazval kvanta. Na začátku dvacátého století prokázal Albert Einstein, že Planckova domněnka byla správná a tyto kvanta o určité energii nazval fotony.

Na otázku, zdali je světlo vlnění nebo proud částic, našel odpověď Erwin Schrödinger, který formuloval korpuskulárně-vlnový dualismus světla. To znamená, že světlo můžeme popsat jako elektromagnetické vlnění, které přenáší určité množství energie, a zároveň jako pohyb částic, který lze popsat pomocí kvantové mechaniky [4].

2.3 Vznik světelného záření

Světelné zdroje rozlišujeme do dvou hlavních skupin. Jsou to zdroje přírodní, které vznikají nezávisle na člověku, a zdroje umělé, které vytváří člověk.

2.3.1 Přírodní zdroje

Tyto zdroje světla člověk svojí přítomností neovlivňuje a vznikají zcela nezávisle po celém vesmíru. Patří sem například kosmická tělesa jako jsou hvězdy, které vyzařují světlo o vlnové délce úměrné její teplotě. Jen pouhým okem vidíme na noční obloze kolem 10 000 hvězd až do vzdálenosti 800 světelných let. Mezi další zdroje patří i Měsíc, který světlo negeneruje, ale jen odráží [5].

Některé chemické reakce jako je oheň také vytváří viditelné světlo. Dále jsem patří živočichové jako jsou světlušky nebo někteří mořští živočichové, které využívají luminiscence a celkově je označujeme jako biologické zdroje světla. V poslední řadě jsem patří elektrické výboje jako je například blesk.

2.3.2 Umělé zdroje

Umělé zdroje vytváří člověk a pracují na základě těchto fyzikálních principů.

- Tepelným buzením při zahřívání pevné látky na vysokou teplotu. Tento jev se nazývá inkandescence (někdy také elektroinkandescence). Tohoto jevu využívají obyčejné žárovky, kdy při průchodu proudu vznikají ve wolframovém vlákně tepelné ztráty, které vlákno ohřeje na vysokou teplotu, při které začne vyzařovat světelné záření v širokém elektromagnetickém spektru. Maximum takového spektra lze vypočítat z Wienova posunovacího zákona:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (1)$$

kde b je Wienova konstanta, jejíž hodnota je přibližně $b = 2,898 \text{ mm} \cdot \text{K}$, T je termodynamická teplota tělesa v kelvinech. Wilhelm Wien dostal roku 1893 Nobelovu cenu za tento objev. Například teplota našeho Slunce je 5780 K. Podle Wienova posunovacího zákona této teplotě odpovídá vyzařování o vlnové délce přibližně 500 nm, která vyvolává vjem žlutozelené barvy. Klasická žárovka má pro porovnání teplotu kolem 2850 K a proto je vyzařuje větší vlnovou délku než Slunce. Tento zdroj světla má ale malou světelnou účinnost, protože většina tepla je přeměněna na teplo. Světelná účinnost a vyzařované spektrum jsou silně závislé na stabilní teplotě zářiče [6].

- Buzením atomů v elektrickém poli. S tímto jevem se potkáme ve výbojových trubkách, kde za nízkého tlaku vzniká doutnavý výboj. Zdrojem záření jsou elektrony, které při vzájemných srážkách excitují do vyšší energetické hladiny a při následné excitaci do stabilní hladiny vyzáří foton o určité energii a vlnové délce. Vznikající světlo je tedy monochromatické. V doutnavé trubici při tlaku 100 Pa vzniká katodové doutnavé světlo, které je namodralé a anodové světlo, které má růžovou barvu. Rtuťové výbojky vyzařují v oblasti neviditelného ultrafialového záření. Proto je vnitřní povrch pokrytý luminoforem, který absorbuje část energie záření a vzniká záření s větší vlnovou délkou [7].
- Luminiscencí pevných látek. Při dopadu záření o určité vlnové délce na pevnou látku dojde k excitaci atomů, které následně vyzáří záření o větší vlnové délce. Pokud je přechod mezi dovolenými stavy, tak se tento děj nazývá fluorescence a trvá několik nanosekund. Při přechodu mezi zakázaným pásmem vzniká fosforescence, která trvá i několik minut. Tento jev využíváme při přeměně ultrafialového světla na světlo o větší vlnové délce. Látky, mající tuto vlastnost, nazýváme luminofory. Luminofory jsou převážně pevné látky obsahující luminiscenční centra. Mezi nejčastější luminofory patří chemické sloučeniny ZnS, CdS s příměsí Cu, Ag nebo Mg. Při tzv. elektroluminiscenci prochází luminoforem elektrický náboj, který má za následek excitaci elektronů a vznik záření o určité vlnové délce [7].
- Emisí fotonů na polovodičovém přechodu. Tohoto jevu využívají LED diody, kdy při průchodu proudu přes polovodičový přechod dochází k přechodu elektronu mezi dvěma energetickými hladinami za emise nekoherentního záření. Vyzařované spektrum závisí na chemickém složení daného polovodiče [1].

3 PARAMETRY SVĚTELNÝCH ZDROJŮ

Všechny fyzikální veličiny a jednotky u světelných zdrojů jsou sjednocené a platí po celém světě díky Mezinárodní komisi pro osvětlování CIE. V mezinárodní soustavě se vyskytuje pouze jedna jednotka a to je jednotka svítivosti kandela (cd). Každý člověk má odlišnou spektrální citlivost oka a proto bylo nutné stanovit normalizovanou křivku spektrální citlivosti fotometrického pozorovatele $V(\lambda)$ [1].

3.1 Světelně technické parametry

Světelně technické parametry dělíme do dvou skupin: radiometrické a fotometrické.

Radiometrické veličiny

Radiometrické veličiny vyjadřují přenos energie elektromagnetickým zářením. Proto se často nazývají energetické. Patří sem například veličiny jako jsou zářivá energie, zářivý tok, zářivost a další. V tabulce č.2 je znázorněn přehled všech radiometrických veličin s příslušnými jednotkami.

Veličina	Symbol	Jednotka	Fyzikální význam veličiny
Zářivá energie	Q	J	Udává množství energie, které těleso vyzáří
Zářivý tok	ϕ_e	W	Vyjadřuje jaké množství energie je přeneseno za jednotku času
Zářivost	I_e	$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$	Reprezentuje výkon vyzářený do jednotkového prostorového úhlu
Zář	L_e	$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	Představuje měrnou zářivost plošného zdroje
Ozářenost	E_e	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	Jedná se o plošnou hustotu světelného toku
Intenzita vyzařování	H_e	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	Plošná hustota světelného toku vyzařována plochou do poloprostoru
Radiozita	J_e	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	Radiozita je součet vlastního a odraženého vyzařování z dané plochy
Spektrální zář	$L_{e\lambda}$	$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$	Zář specifické vlnové délky
Spektrální ozáření	$E_{e\lambda}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$	Ozáření specifické vlnové délky

Tabulka 2 Radiometrické veličiny [8]

Radiometrické veličiny se dělí na integrální a spektrální. Radiometrické integrální veličiny představují například pro zářivou energii celkové množství dílčích energií jednotlivých vlnových délek, zatímco u spektrální zářivé energie se jedná o energii pouze jedné vlnové délky [9].

Fotometrické veličiny

Fotometrické veličiny jsou vztaženy na spektrální citlivost lidského oka a kvantitativně hodnotí velikost vizuálního vjemu. V tabulce č.3. je zobrazen přehled fotometrických veličin a jejich jednotek. Fotometrická veličina svítivost s jednotkou kandela je jediná fotometrická veličina, která patří mezi základní jednotky SI [9].

Veličina	Symbol	Jednotka	Fyzikální význam veličiny
Světelná energie	Q_V	lm·s	Udává zářivou energii, která vyvolává určitý zrakový vjem ve viditelném spektru
Světelný tok	ϕ	lm	Světelná energie procházející danou plochou za jednotku času
Svítivost	I	cd	Prostorová hustota světelného toku
Jas	L	cd·m ⁻²	Představuje měrnou zářivost plošného zdroje
Osvětlení	E	lm·m ⁻²	Světelný tok dopadající na určitou plochu
Světlení	H	W·m ⁻²	Světelný tok vyzařován z plošného zdroje
Světelná účinnost	K	lm·W ⁻¹	Poměr světelného a zářivého toku

Tabulka 3 Přehled fotometrických veličin [9]

Fotometrické veličiny dělíme také na integrální a spektrální. Integrální veličina představuje například světelný tok celého spektra na rozdíl od spektrálního světelného toku, který je vztažen k určité vlnové délce. Spektrální veličiny mají v indexu symbol λ .

3.1.1 Světelný tok

Světelný tok ϕ je úměrný zářivému toku ϕ_e , který udává množství energie přenesené ze světelného zdroje fotony do svého okolí za jednotku času a je posuzován z hlediska spektrální citlivosti normalizovaného fotometrického pozorovatele. Dále kvantitativně popisuje velikost vyvolaného zrakového vjemu. Jednotkou světelného toku je lumen (lm).

Zářivý tok je definován:

$$\phi_e = \int_0^\infty \phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda = \int_0^\infty \frac{\phi_e(\lambda)}{d\lambda} d\lambda = \sum_{i=1}^n (\phi_{e\lambda})_i \Delta\lambda_i \quad (2)$$

kde výraz $\frac{\phi_e(\lambda)}{d\lambda}$ představuje spektrální hustotu zářivého toku [W/m².nm],

$\phi_{e\lambda}$ je spektrální zářivý tok [W].

Tato rovnice platí pouze v případě spojitého vyzařování. Pokud se jedná o záření monochromatické, kdy záření obsahuje určité množství monochromatických toků, potom je celkový zářivý tok dán součtem všech těchto jednotlivých monochromatických složek.

$$\phi_e = \sum_{i=1}^n \phi_{ei}(\lambda_i) \quad (3)$$

kde ϕ_{ei} je zářivý tok jednotlivých monochromatických složek čárového spektra

K určení světelného toku ϕ využíváme funkci $V(\lambda)$, která vyjadřuje spektrální citlivost normálního pozorovatele a je normalizovaná pro denní vidění Mezinárodní komisi pro osvětlení CIE. Tato funkce je definována:

$$V(\lambda) = \frac{K_\phi(\lambda)}{K_m} = \frac{K(\lambda)}{683} \quad (4)$$

kde $K_\phi(\lambda)$ se nazývá světelná účinnost [lm/W].

K_m reprezentuje maximální světelnou účinnost zářivého toku o velikosti 1 W při vlnové délce $\lambda = 555$ nm. Na tuto vlnovou délku je během dne lidské oko nejcitlivější. Tato hodnota pro normalizovaného pozorovatele byla stanovena na $K_m = 683$ lm/W.

Světelný tok získáme vynásobením zářivého toku světelnou účinností nebo maximální světelnou účinností a poměrnou světelnou účinností.

$$\phi(\lambda) = K_\phi(\lambda)\phi_e(\lambda) = K_m V(\lambda)\phi_e(\lambda) = 683 V(\lambda)\phi_e \quad (5)$$

Tento vztah platí opět pro spojitě vyzařování a pro monochromatické záření se používá zjednodušení, kdy se spektrum rozdělí na n úseků. Pro každý úsek se stanoví střední hodnota zářivého toku a poměrné světelné účinnosti. Celkový světelný tok je dán sumou všech těchto středních hodnot.

$$\phi(\lambda) = K_m \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta\phi_e(\lambda_i)}{\Delta\lambda_i} \right) V(\lambda) \Delta\lambda_i = 683 \int_0^\infty \left(\frac{\phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right) V(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

Z výše uvedených vztahů je patrné, že světelný tok závisí na velikosti zářivého toku, ale i na vlastnostech fotopického vidění, které reprezentuje poměrná světelná účinnost, která nabývá maximální hodnoty 1. Součin této funkce s maximální světelnou účinností $K_m = 683$ lm/W se získá světelná účinnost $K_\phi(\lambda)$.

Zářivý tok patří do skupiny radiometrických veličin, zatímco světelný tok je stažen ke spektrální citlivosti lidského oka a tedy patří do fotometrických veličin [1].

3.1.2 Svítivost

Svítivost vyjadřuje hustotu světelného toku v prostoru. Svítivost se určuje pouze pro bodové zdroje světla, které mají zanedbatelné rozměry vůči vzdálenosti od tohoto zdroje. Jednotka svítivosti je kandela (cd), která patří mezi základní jednotky SI.

Kandela je definována jako svítivost zdroje, který vyzařuje pod daným prostorovým úhlem monochromatické záření o vlnové délce $\lambda = 555 \text{ nm}$ ($f = 540 \text{ THz}$) s intenzitou $1/683 \text{ W/sr}$. Název jednotky byl odvozen z římského slova candela, v překladu svíce, svíčka. Střední hodnota svítivosti se určí následujícím vztahem.

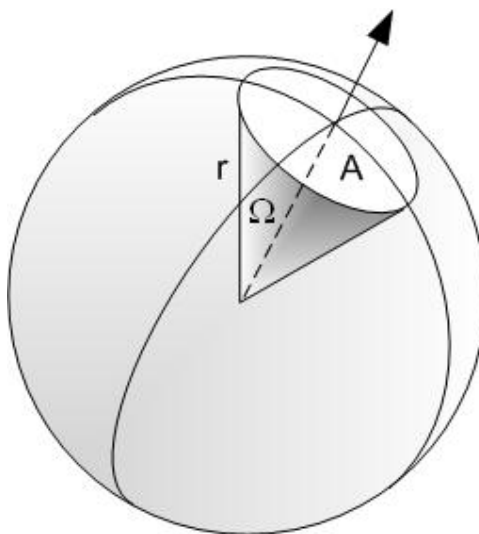
$$I = \frac{d\phi}{d\Omega} \quad (7)$$

kde Ω je prostorový úhel, který má jednotku steradián [sr] a je definován:

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (8)$$

kde A je obsah kulové plochy [m^2] a r je poloměr koule [m]

Steradián patří mezi odvozené jednotky SI a odpovídá prostorovému úhlu, který je vymezen na jednotkové kouli ze středu na jednotkovou plochu na povrchu koule. Steradián je bezrozměrná jednotka. Plný prostorový úhel je roven 4π .



Obrázek 3 Znáznornění prostorového úhlu [10]

Světelný zdroj se v praxi považuje za bodový splňuje-li následující podmínku. Poměr vzdálenosti světelného zdroje a jeho rozměrů nesmí být menší než 5.

3.1.3 Osvětlenost

Osvětlenost se často nazývá intenzitou osvětlení a reprezentuje velikost světelného toku dopadající na jednotkovou plochu o velikosti 1 m^2 . Jednotkou osvětlenosti je lux (lx). Osvětlenost je definována:

$$E = \frac{d\phi}{dA} \quad (9)$$

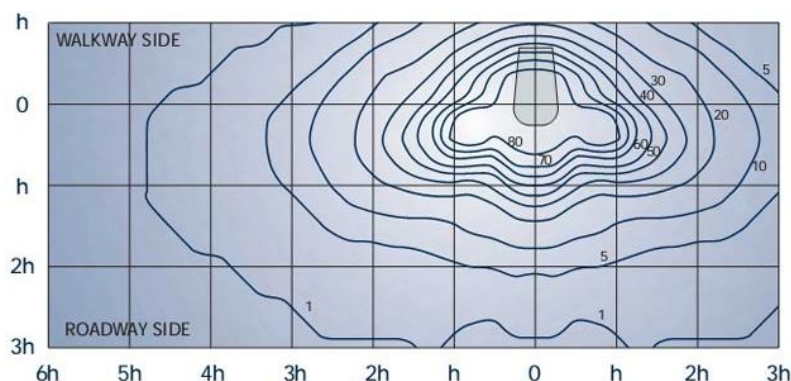
kde dA představuje plochu, na kterou dopadá světelné záření o velikosti světelného toku $d\phi$.

Pokud u bodového zdroje známe úhel β , který svírá normála osvětlované plochy s dopadajícím paprskem světla, lze vyjádřit velikost osvětlení tímto vztahem:

$$E = \frac{I_{\gamma} \cos \beta}{l^2} \quad (10)$$

kde l je vzdálenost světelného zdroje od plochy (m). Z toho vztahu vyplývá, že osvětlenost klesá se čtvercem vzdálenosti od světelného zdroje. Tato závislost se často označuje jako čtvercový zákon. Svítivost I_{γ} klesá s rostoucím úhlem β . Tento jev se nazývá Kosinův zákon. Pokud je tento úhel nulový, potom platí rovnost $I_{\gamma} = I_0$ a velikost osvětlení nabývá maximální hodnoty, která se často označuje E_n (normálová osvětlenost). V případě, kdy je světlený paprsek kolmý na normálu osvětlené plochy, velikost svítivosti nabývá nulové hodnoty $I_{\gamma} = 0$.

Měření osvětlenosti se provádí v rovnoměrně rozložené síti bodů. Body o stejné velikosti se spojí do křivky - izoluxy a vzniká tak izoluxní mapa.



Obrázek 4 Izoluxní křivky [9]

V následující tabulce jsou uvedeny orientační příklady osvětlení některými přírodními zdroji.

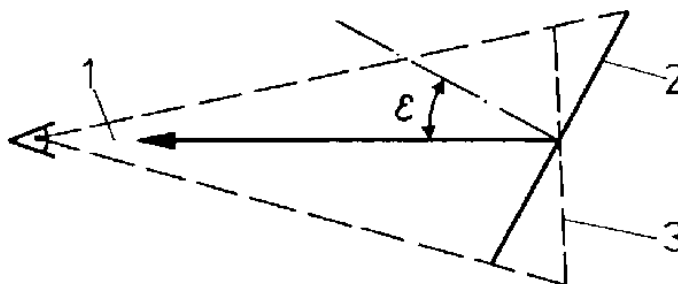
Zdroj světla	Osvětlenost [lx]
Měsíc v úplňku při vyjasněné obloze	0,27
Východ slunce při vyjasněné obloze	3,40
Západ slunce při vyjasněné obloze	400
Zatažená obloha	1000
Nepřímé denní světlo	10000 - 25000
Přímé denní světlo	32000 - 130000

Tabulka 4 Příklady velikosti osvětlení přírodními zdroji [11]

3.1.4 Jas

Jas se často nazývá jako měrná svítivost a reprezentuje plošnou a prostorovou hustotu světelného toku [1]. Značí se velkým písmenem L a má jednotku kandela na metr čtvereční (cd/m^2). Velikost jasu se tedy mění v závislosti na poloze pozorovatele. Jas dosahuje nejvyšší hodnoty v okamžiku, kdy se pozorovatel dívá na plošný světelný zdroj pod úhlem 90° .

Zdrojem jasu může být i plocha, která světlo pouze reflektuje. V tomto případě svazky paprsků vynášíme jako radiusvektory a dostáváme fotometrickou plochu, ze které pomocí řezu ku vztahnému bodu získáme čáry jasu. Na obrázku č.4 je popsána definice jasu.



Obrázek 4 Znárodnění definice jasu [8]

1. Svítivost [lm]
2. Svítící plocha [m^2]
3. Pozorovatelem viditelná plocha [m^2]

Jas svazku paprsků se matematicky vyjádří:

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega \cdot dA} = \frac{d^2\Phi}{dG} \quad (11)$$

kde $d\Omega$ je prostorový úhel [sr], dA plocha kolmá k ose svazku, dG geometrická velikost svazku[1].

Zjednodušeně se jas vypočítá:

$$L = \frac{I}{S_p} \quad (12)$$

kde S_p je plocha viditelná pozorovatelem [m^2]

Lidské oko přímo nereaguje na jas ale na tzv. kontrast jasu, který se značí K a má bezrozměrnou jednotku. Matematicky je definován:

$$K = \frac{|L_a - L_b|}{L_b} \quad (13)$$

kde L_a je jas předmětu a L_b je jas pozadí [cd/m^2]

3.1.5 Světlení

Světlení udává velikost světelného toku vyzařovaného z určité plochy. Značí se M a má jednotku lumen na metr čtvereční (lm/m^2). Jas a světlení má tuto fyzikální souvislost:

$$M = \int_0^\Omega L_\gamma \cos \gamma = \int_0^\Omega f_L(\gamma) \cos \gamma d\Omega = L_0 \int_0^\Omega f_1(\gamma) d\Omega = L_0 \Omega_e \quad (14)$$

kde L_γ je jas vyzařovaný plochou dA pod úhlem γ od normály této plochy, L_0 je jas vyzařovaný plochou dA ve směru normály, Ω prostorový úhel, Ω_e ekvivalentní prostorový úhel.

Ekvivalentní prostorový úhel Ω_e reprezentuje prostorový úhel, do kterého bodový zdroj vyzáří veškerý svůj světelný tok [1].

3.1.6 Měrný světelný výkon

Měrný světelný výkon je jedním z nejdůležitějších parametrů světelných zdrojů. Měrný výkon udává, jak velký světelný tok dokáže světelný zdroj vyzářit při příkonu jednoho wattu. Značí se η a má jednotku lumen na watt (lm/W). U světelných zdrojů bez předřadníku je udávaný výkon stejný jako příkon světelného zdroje. U světelných zdrojů s předřadníkem se musí počítat s výkonem spotřebovaným předřadníkem [1].

$$\eta = \frac{\phi}{P} \quad (15)$$

kde P je elektrický příkon světelného zdroje [W], ϕ světelný tok [lm]

V tabulce č.5 je znázorněn přehled světelných zdrojů a jejich měrný světelný výkon.

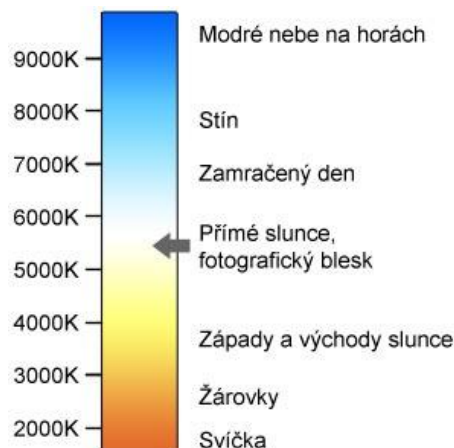
Světelný zdroj	Měrný světelný výkon [lm/W]
Klasické žárovky	10-18
Halogenové žárovky	15-20
Kompaktní zářivky	35-70
Lineární zářivky	50-100
Metal-halogenidové výbojky	60-100
Vysokotlaké sodíkové výbojky	70-140
Nízkotlaké sodíkové výbojky	90-180
LED studené bílé	60-100
LED teplé bílé	40-80

Tabulka 5 Měrný světelný výkon jednotlivých typů světelných zdrojů [12]

V laboratorních podmínkách dosahuje měrný světelný výkon LED diod až hodnoty $\eta = 200 \text{ lm}/\text{W}$. Nejvyššího měrného světelného výkonu dosahují vysokotlaké a nízkotlaké sodíkové výbojky. Nevýhodou nízkotlaké sodíkové výbojky je její index podání barev, který se blíží k nulové hodnotě.

3.1.7 Teplota chromatičnosti

Teplota chromatičnosti světelného zdroje udává teplotu, kterou by muselo mít černé těleso, aby vyzařovalo stejné spektrum bílého světla jako má světelný zdroj. Značí se T a má jednotku jeden kelvin (K). U výbojkových a LED světelných zdrojů se používá náhradní teplota chromatičnosti, která se značí T_n .



Obrázek 5 Spektrum bílého světla [13]

Z obrázku 9 je patrné, že s zvyšující se teplotou chromatičnosti roste podíl modré složky a snižuje se podíl červené složky spektra. Teplota našeho Slunce činí přibližně 5800K a proto ho vnímáme jako žluté i přesto, že vyzařuje spektrum s maximem v oblasti zelené. Bílé světlo rozlišujeme na teplé a studené, které mají odlišný psychický vliv na člověka.

Teplá bílá má nažloutlý nádech klasické žárovky a působí na člověka příjemně a útulně. Doporučuje se používat v prostorách, kde se má člověk cítit uvolněně. Například obývací pokoj, ložnice nebo dětský pokoj. Studená bílá je pocitově neutrální a doporučuje se používat v pracovnách, koupelnách a kancelářích s nedostatkem denního světla [14]. V tabulce č.6 je přehled světelných zdrojů a jejich teplot chromatičnosti.

Světelný zdroj	Teplota chromatičnosti [K]
Červená LED	600
Svíčka	1000-1200
Žárovka	2800
Východ a západ Slunce	2800
Denní světlo	5000
Fotografické blesky, výbojky	5500
Polední světlo	6000
Standardizované denní světlo	6500
Oblačno, mlhavo	7000-9000
UV solární výbojky	14000

Tabulka 6 Teplota chromatičnosti světelných zdrojů [13]

3.1.8 Index podání barev

Index podání barev u světelných zdrojů udává věrnost reprodukce barev osvětlovaných předmětů. Značí se R_a a nabývá hodnot od 0 do 100, kdy hodnota 100 udává naprosto věrné podání barev při slunečním osvětlení. Někdy se označuje u zobrazovacích zařízeních jako CRI (Color Rendering Index). Při nulové hodnotě R_a světelného zdroje není možno rozeznat okolní barvy [14]. Tabulka č.7 zobrazuje přehled světelných zdrojů a jejich indexu podání barev.

Světelný zdroj	Index podání barev R_a
Klasické žárovky	90-100
Halogenové žárovky	90-100
Kompaktní zářivky	75-95
Lineární zářivky	68-95
Metal-halogenidové výbojky	60-85
Vysokotlaké sodíkové výbojky	20-60
Nízkotlaké sodíkové výbojky	0
LED	65-90

Tabulka 7 Přehled indexů podání barev různých světelných zdrojů [13]

Velice dobrý index podání barev mají žárovky a halogenové zářivky, které vyzařují v širokém spektru. U nejlevnější svítivé diody je index podání barev $R_a = 62$. Většina komerčních diod se pohybuje v pásmu $R_a = 70 - 80$. Vyrábějí se i vzácně LED s $R_a = 90$. Tyto LED mají menší světelnou účinnost, protože pro zvýšení indexu podání barev se využívá luminoforu, který pohlcuje určitou část energie záření. Rozdíl světelného toku u LED čipů s indexem podání barev 70 a 80 činí asi 15%. Pro měření indexu barev se používá spektrometr, který porovnává škálu 15 barev.

V domácnostech a kancelářích se doporučuje požití světelných zdrojů s $R_a = 80$ a více. Tuto podmínku splňuje většina světelných zdrojů na trhu. V průmyslových prostorech je normou stanovena minimální hodnota $R_a = 65$. Index podání barev je nejdůležitějším kvalitativním parametrem světelných zdrojů používaných v tiskárnách a všude tam, kde je vyžadována vysoká věrnost reprodukce barev [15].



Obrázek 6 Porovnání indexů podání barev [15]

3.2 Elektrické parametry

3.2.1 Elektrický příkon

Elektrický příkon je nejdůležitější z elektrických parametrů. U žárovek, které představují čistě odporovou zátěž, je roven elektrický příkon činnému výkonu.

U výbojkových a luminiscenčních zdrojů obsahuje světelný zdroj předřadník, který se skládá z akumulacních prvků. Předřadník obsahuje často vysokofrekvenční filtr, usměrňovač, střídač a stabilizační induktor a proto tedy celkový účinník odběru nemůže být roven jedné.

U halogenových zářivek dosahuje příkon hodnoty až 20 000W. Tyto žárovky se používají ve filmových a televizních ateliérech [15].

V tabulce č.10 je zobrazena většina světelných zdrojů a jejich jmenovité příkony. Halogenové žárovky dosahují pomocí halogenů mnohem vyšších výkonů než klasické vakuové žárovky. Lineární zářivky s vyšším průměrem lépe odvádí teplo a to umožňuje dosažení vyšších výkonů.

V tabulce č.8 jsou zobrazeny světelné zdroje a jejich elektrické příkony.

Světelný zdroj	Typ	Jmenovité příkony [W]
Žárovka	Klasická	15 - 300
Žárovka halogenová	230V	20 - 20 000
	12V	5 - 400
Zářivka	Lineární Ø16mm	14 - 35
	Lineární Ø 26mm	10 - 58
	Lineární Ø 38mm	20 - 65
	Kompaktní	3 - 150
	Kruhová	22 - 40
Výbojka	Vysokotlaká rtuťová	50 - 2000
	Halogenidová	35 - 2000
	Vysokotlaká sodíková	35 - 1500
	Nízkotlaká sodíková	17,5 - 180
	Indukční	55 - 85
LED	Jeden čip	1 - 10

Tabulka 8 Jmenovité příkony jednotlivých typů světelných zdrojů [14], [15]

Halogenidové žárovky existují i provedení o příkonu až 20 kW. Z výbojek dosahuje nejvyššího výkonu halogenidová a vysokotlaká rtuťová výbojka a to až příkonu 2000W [15].

Dnešní výkonové diody dosahují hodnot výkonu v řádu wattů. Hodnoty budícího proudu se nacházejí v rozmezí $I = 10 - 3000$ mA. Tyto diody generují velké ztrátové teplo ve velice malém prostoru a proto je nutné je dostatečně chladit, aby nedocházelo ke zničení diody nebo zkrácení její životnosti.

3.2.2 Napájení a odebíraný proud

Dalším důležitým parametrem světelných zdrojů je napájecí hladina. Většina světelných zdrojů je konstruována na síťové napětí 220 - 240 V. Životnost klasických žárovek je vysoce závislá na velikosti napájení. Naše energetická síť garantuje maximální odchylku v napájecí síti 10%. V minulosti se tedy vyráběly žárovky na napájecí hladinu 230V a 240V. Vzroste-li napětí například o 5%, sníží se životnost o 50%.

Halogenové žárovky se vyrábějí na nejvyšší hladinu napájení 20 kV a na nejnižší napětíovou hladinu 12V. Pro napětově stabilizované napájení se používá elektronický transformátor, který musí být umístěn v blízkosti žárovky. Pro napětově nestabilizované napájení se používá toroidní transformátor [16], [19].

Zářivky se napájejí pomocí indukčního nebo elektronického předřadníku. U indukčního předřadníku nalezneme tlumivku, startér a kompenzační kondenzátor. Při sepnutí obvodu nejdříve prochází proud obvodem se startérem, který je tvořen bimetalem. Po určité době se bimetal rozpojí a proud prochází obloukem v zářivce. Nevýhodou je vysoká hmotnost tlumivky a blikání zářivky při rozběhu [19].



Obrázek 7 Halogenová žárovka firmy SilverBullet 20 kW [19]

U elektronického předřadníku je použit usměrňovač, střídač a vysokofrekvenční transformátor s feritovým jádrem. Napájení vysokofrekvenčním střídavým proudem o frekvenci v rozmezí 30 - 50 kHz odstraňuje blikání zářivky během provozu a umožňuje plynulejší start. Vysokofrekvenční transformátor je menší a lehčí oproti velké tlumivce v indukčním předřadníku. Elektronický předřadník jednoznačně prodlužuje životnost zářivky a zvyšuje kvalitu světla. Navíc některé elektronické předřadníky nabízejí funkci stmívání [19].



Obrázek 8 Elektronický předřadník pro lineární zářivky

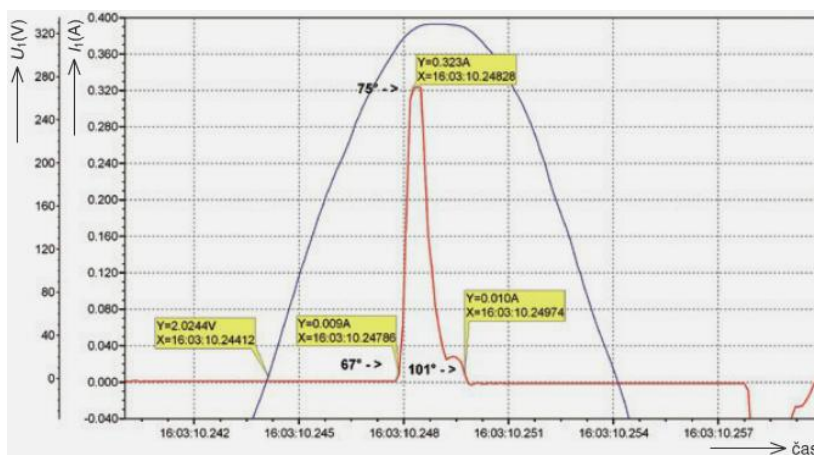
LED diody není možné připojit na síťové napětí. Lze je provozovat pouze na nízkém napětí. Výkonové LED diody se zapojují většinou do série a napájejí se proudovými zdroji se stabilizací napájecího proudu. Proudový zdroj nemusí být v neprostřední blízkosti LED diod [14].

Paralelní spojení je také možné, ale je nutné splnit následující podmínky. Všechny LED bloky musí být na stejném chladiči, protože kdyby měly diody v paralelních větvích různé teploty, tekla by jimi rozdílný proud a některé diody by mohly být poškozeny. Pro stabilizaci proudu se do série připojuje malý odpor k diodě. Často se tento problém řeší pomocí odporu přívodů stejné délky a průřezu v každé paralelní větvi.

Předřadníky pro LED se vyrábí nejčastěji na 230 V nebo 12 V. Mají pevně nastavený stabilizační proud. Regulace je možná pomocí výkonového triaku ve vypínači. To umožňuje stmívání LED a při použití dálkového přijímače i ovládání na dálku.

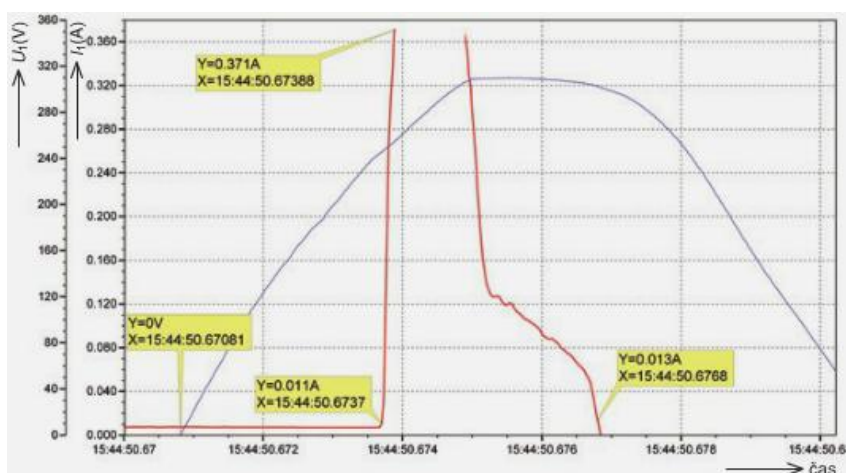
Klesající cena a vzrůstající výkon LED má za následek masovou instalaci. Tento trend může mít neblahé následky na energetickou soustavu. Klasická žárovka má čistě odporový charakter a odebíraný proud je ve fázi s napětím. U světelných zdrojů s předřadníky je odebíraný proud kapacitního charakteru. Celkový účinník odběru je tedy menší než jedna. Odebíraný proud obsahuje navíc velké množství harmonických složek.

Pro kompenzaci kapacitního odběru je nutné použít tlumivku. Tlumivka má čistě odporové ztráty ve vinutí, které jsou závislé na konstrukci tlumivky a bývají v rozsahu 1-5% indukčního výkonu tlumivky. Navíc je tlumivka zdrojem třetí, páté a sedmé harmonické složky proudu [21].



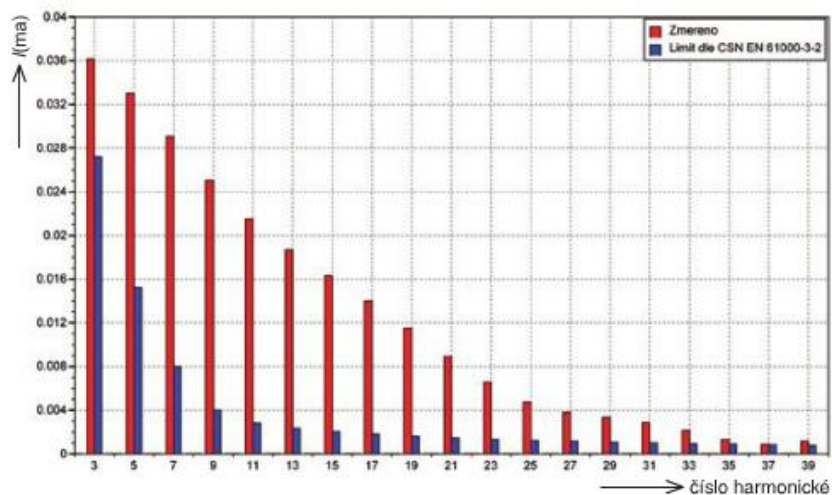
Obrázek 9 Průběh odebíraného proudu LED zdrojem 8 W [21]

Na obrázku č.9 je znázorněn průběh odebíraného proudu staršího LED předřadníku. Novější předřadníky mají průběh odebíraného proudu o něco lepší. Na obrázku č.10 je pro porovnání zobrazen průběh odebíraného proudu kompaktní zářivky o příkonu 20 W [21].



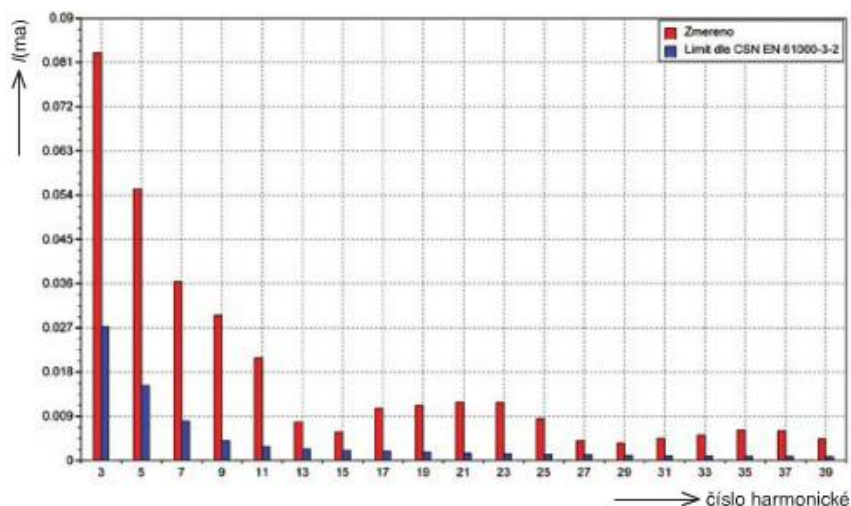
Obrázek 10 Průběh odebíraného proudu kompaktní zářivkou 20 W [21]

Elektronické předřadníky pro LED mají vysoký harmonické zkreslení THD jalového výkonu. Ten reprezentuje podíl mezi první harmonickou a součtem všech harmonických složek jalového výkonu. To má za následek odběr vyšší hodnoty proudu než hodnoty vypočítané z udávaného příkonu. Elektronické předřadníky pro úsporné kompaktní zářivky mají podobné harmonické zkreslení jako pro LED [21].



Obrázek 11 Liché harmonické složky LED zdroje 8 W [21]

Pro posouzení, zda-li je světelný zdroj vyhovující, existují dvě kritéria. První kritérium je obsaženo v normě ČSN EN 61000-3-2, která stanovuje přípustné úrovně jednotlivých harmonických složek odebíraného proudu. Většina současně instalovaných předřadníků tuto normu nesplňuje [21].



Obrázek 12 Liché harmonické složky kompaktní zářivky 20 W s patičí E27 [21]

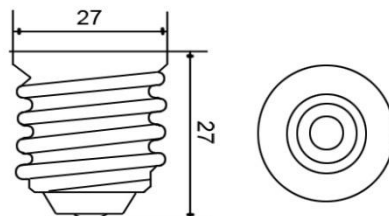
Druhým kritériem je tvar vlny vstupního proudu. Odebíraný proud by měl být co nejvíce podobný sinusovému průběhu. Bohužel i zde většina předřadníků nesplňuje tento předepsaný tvar vlny. V budoucnu lze předpokládat zvyšující se snahu o zlepšení tvaru odebíraného proudu [21].

3.3 Ostatní parametry

3.3.1 Patice

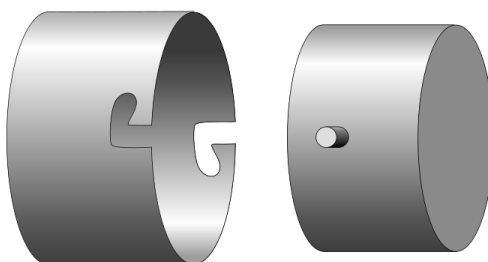
Patice je elektromechanická součástka, která slouží k mechanickému upevnění světelného zdroje a elektrickému připojení k napájecí soustavě. Bývá konstruována k jednoduché montáži a demontáži světelného zdroje bez přítomnosti kvalifikovaného pracovníka. Patice dělíme podle způsobu montáže na šroubovací, bajonetové, kolíčkové a další typy.

- Šroubovací patice využívá Edisonův závit a označují se E10, E14 (malý Edisonův závit), E27 (velký Edisonův závit), E40, kde číslo reprezentuje vnější průměr patice v milimetrech. Edisonův závit je složen z kruhových oblouků a tedy nemá ostré hrany. Nejčastěji se používají patice E27 pro napětí 230V u žárovek, výbojek a LED světelných zdrojů.



Obrázek 13 Patice typu E27 [22]

- Bajonetová matice má tvar hladkého válce se dvěma výstupky. Tyto výstupky jsou protilehlé a zapadají v objímce do výřezu tvaru písmena L, kde je na dně objímky odpružený kontakt, který se musí zatlačit a teprve potom lze s paticí otočit a zajistit ji. Tato konstrukce má výbornou odolnost proti otřesům a proto se často využívají u světlometů dopravních prostředků.



Obrázek 14 Bajonetová patice [22]

- Kolíčkové matice se používají u kompaktních zářivek. Tvar patic a objímek je dán příslušnou normou. Tato patice se nešroubuje, pouze se zasunuje. Mezi běžné typy patří typy G5, G9, GU10 a G13, kde číslo označuje vzdálenost mezi dvěma kolíky. Nejpoužívanější je patice GU10, která se nejčastěji vyskytuje u halogenových zdrojů, které se připojují na síťové napětí a používají se často v kuchyních a koupelnách.

Pro připojení halogenových světelných zdrojů přes transformátor na napětí 12V se využívá patice MR16 (GU5,3). Kolíčky mají průměr jednoho milimetru [23].



Obrázek 15 Kolíčkové patice [24]

U zářivek se používá systém dvou nebo čtyř kolíků. Zářivka, která obsahuje integrovaný startér, má dva kolíky a vyžaduje externí tlumivku. Zatímco žárovka se čtyřmi kolíky využívá externího předřadníku, který je elektronický nebo se skládá ze startéru a tlumivky a nazývá se konvenční.

U lineárních zářivek se používá patice G5 pro žárovku s průměrem 16mm a G13 pro průměr 26mm. U kompaktních jednopaticových zářivek se vyskytují patice G23 a 2G11 [22].

3.3.2 Střední doba života zdroje

Střední doba života (životnost) zdroje je taková doba, po jejíž uplynutí pracuje z původního počtu pouze polovina světelných zdrojů (u LED svítidel), které vyzařují minimálně 70% původního světelného toku. Pro jednotlivý světelný zdroj platí pouze druhá podmínka.

Životnost světelného zdroje závisí především na typu světelného zdroje a kvalitě zpracování. Drahá a kvalitně zpracovaná žárovka může mít delší životnost než levná, nekvalitně vyrobená dioda. Indikační kvalitní žárovka má například životnost až 8000 hodin, zatímco nejlevnější dioda 5000 hodin. Životnost dále ovlivňuje provozní teplota, poloha zdroje, napájecí napětí nebo kvalita startéru u zářivek.

U halogenových žárovek může drasticky snížit životnost vrstva soli, která je obsažená v lidském potu a postupně se vleptává do povrchu skla, až dojde k přehřátí a prasknutí skla. Proto se doporučuje halogenovou žárovku po instalaci otřít lihem. U lineárních zářivek rozhoduje kvalita startéru. Pokud je použit indukční startér, nebude životnost dosahovat hodnot jako při použití elektronického předřadníku.

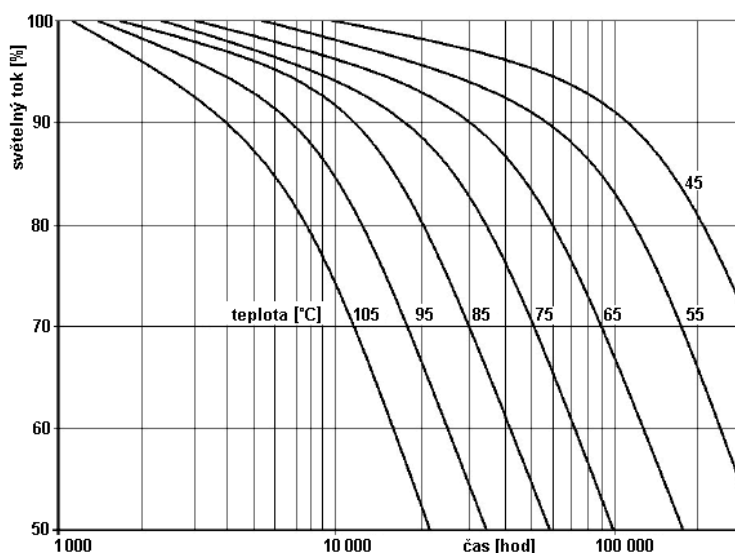
Z tabulky č.9 je patrné, že nejdelší životnost dosahují LED světelné zdroje a indukční výbojky. Zářivky a výbojky dosahují životnosti až 18 000 hodin. Nejhorší životnost mají tepelné žárovky. U klasických tepelných žárovek se odpařuje wolfram a usazuje se na skleněné baňce. To snižuje celkový světelný tok a životnost žárovky. U halogenové žárovky vznikají v baňce wolframové páry, které zpomalují proces odpařování wolframu z vlákna a to zvyšuje celkovou životnost [16].

V tabulce č.9 je přehled světelných zdrojů a jejich životností.

Světelný zdroj	Typ	Životnost [h]
Žárovka	Klasická	1000
Žárovka halogenová	230V	2000-3000
	12V	3000-4000
Zářivka	Lineární 16mm	8000-18000
	Lineární 26mm	8000-18000
	Lineární 38mm	8000-18000
	Kompaktní	6000-16000
Výbojka	Vysokotlaká rtuťová	6000-12000
	Halogenidová	6000-15000
	Vysokotlaká sodíková	15000-18000
	Nízkotlaká sodíková	18000
	Indukční	60000
LED		20000-100000

Tabulka 9 Životnost jednotlivých typů světelných zdrojů [18]

U LED světelných zdrojů závisí životnost na provozní teplotě. U LED světelných zdrojů se pohybuje měrný výkon v rozmezí 60- 100 lm/W. To ve výsledku znamená, že pouze kolem 15% dodané energie se přemění na světlo. Zbylých 85% se přemění na teplo, které je nutno v dostatečné míře odvádět z čipu do chladiče. U LED modulů je vhodné použít společný chladič a odvádět generované teplo[15], [19]. Nejčastěji se používají hliníkové chladiče. Pro 7W LED modul je nutné použít chladič s tepelným odporem alespoň 3 K/W [26].



Obrázek 16 Závislost životnosti LED na teplotě čipu [26]

Na obrázku č.16 jsou znázorněny životnosti LED v závislosti na teplotě čipu. Ze závislosti je patrné, že teplota a tedy i účinnost chlazení se projevuje ve značné míře na životnosti LED.

4 MĚŘENÍ SVĚTELNĚ-TECHNICKÝCH PARAMETRŮ

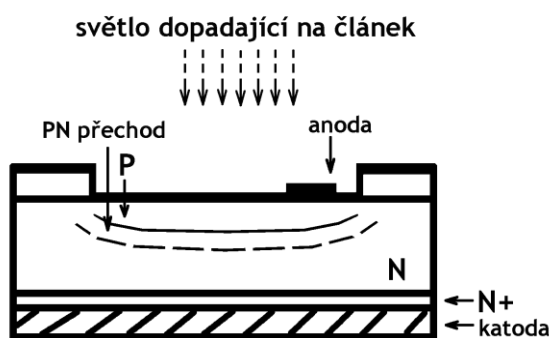
Fotometrie se zabývá měřením světelně-technických veličin jako je světelný tok, svítivost nebo osvětlení. Měření fotometrických veličin je normované podle normy ČSN. Pro objektivní měření se využívají fotoelektrické články (fotočlánky).

4.1 Fotočlánky

Fotočlánek, někdy nazývaný jako fotodetektor, je elektrotechnická součástka, která mění dopadající světlo (osvětlení) na napětí. Nejčastěji se používají fotočlánky hradlové, které jsou dnes nejčastěji z křemíku (dříve selenové).

Princip fotočlánku je následující. Při dopadu světla na povrch fotočlánku vzniká napětí mezi kovovou vrstvou (platina, zlato) a polovodičem. To zapříčiní průchod fotoelektrického proudu obvodem. Pro lineární závislost fotoproudu na osvětlení musíme splnit, aby vstupní odpor se blížil nule a výstupní odpor měřicího systému se blížil nekonečnu.

Nejčastěji se používá ve fotočláncích fotodiody, která má na povrchu velice tenkou vrstvu polovodiče typu P. Při dopadu fotonu vzniká pár elektron-díra. Vzniklé elektrony přechází do polovodičové vrstvy N a díry do P vrstvy. Na přechodu vzniká proud úměrný velikosti osvětlení povrchu fotodiody. Spektrální citlivost se dá měnit pomocí tloušťky vrstev P, N, N^+ a koncentrací příměsí [27].

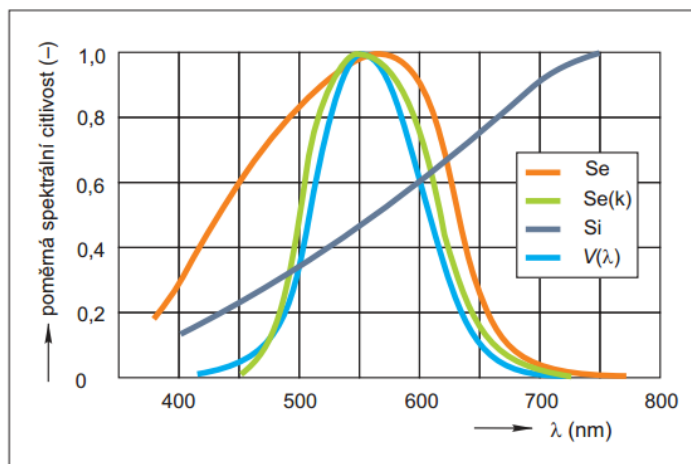


Obrázek 17 Princip fotodiody [28]

Pro měření fotometrických veličin je nutno aplikovat do fotočlánku filtr, který upravuje spektrální citlivost fotodiody na křivku spektrální citlivosti normalizovaného pozorovatele $V(\lambda)$. Spektrální křivka selenového fotočlánku se příliš neliší od normované spektrální citlivosti a se koriguje pomocí speciálních filtrů.

U křemíkových fotočlánků je spektrální křivka velice odlišná a proto je nutné korigovat celou oblast viditelného spektra pomocí skleněných monochromatických filtrů. Nevýhodou selenových fotočlánků je pokles proudu při konstantním osvětlení (tzv. únava fotočlánku) a velká teplotní závislost. Křemíkové fotočlánky jsou v tomto ohledu mnohem stabilnější. Křemíkové fotočlánky mohou pracovat do teploty 50° s maximální odchylkou $\pm 1\%$ [29].

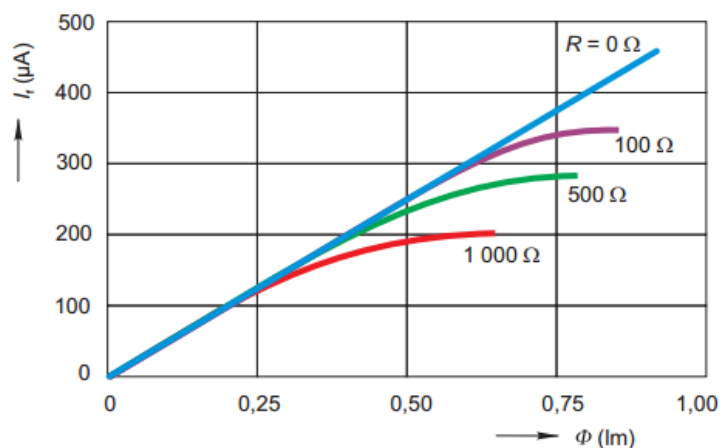
Na obrázku č.18 jsou zobrazeny spektrální citlivosti hradlových článků.



Obrázek 18 Spektrální citlivosti hradlových fotočlánků [29]

Místo fotodiody se také používají emisní fotonky, u kterých se využívá vnějšího fotoelektrického jevu. Elektroda je umístěna ve vakuu nebo plynném prostředí a emituje elektrony po dopadu fotonů. Anoda je drátěná smyčka nebo síťka. Katoda je tvořena alkalickou vrstvou, nanesené na vnitřní straně baňky. Emisní fotonky jsou velice přesné a stabilní, ale vyžadují ke své činnosti externí napájení. K přizpůsobení spektrální citlivosti se využívá kapalinových filtrů [27].

Na obrázku č.19 je zobrazena závislost fotoproudu selenového fotočlánku na vnitřním odporu. Charakteristika je lineární pouze při nulovém vnitřním odporu. V praxi se využívá pro zmenšení celkové chyby kompenzačního zapojení, kdy se měří fotoelektrický proud článku nakrátko.



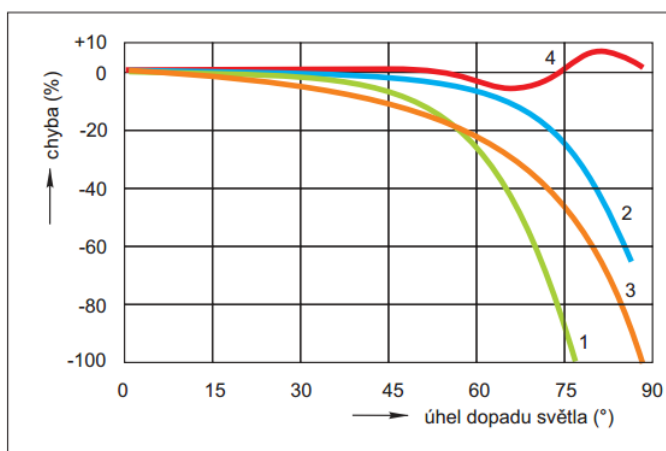
Obrázek 19 Závislost fotoproudu na vnitřním odporu selenového fotočlánku [29]

V případě měření velmi nízkých hodnot se primární fotoelektrický proud zesiluje pomocí sekundární emise fotoelektrického násobiče. Nevýhodou je zhoršení stability a nutnost vysoce stabilizovaného zdroje vysokého napětí.

Fotočlánky lze rozdělit podle směrové selektivity na:

- Fotočlánky pro rovinné měření osvětlenosti.
- Fotočlánky pro měření prostorového osvětlení.
- Fotočlánky se snímacím úhlem $\pm 10^\circ$ od osy snímání

Fotočlánky jsou kalibrovány pro kolmý dopad světla. Osvětlenost při dopadu šikmo na povrch je úměrná cosinu úhlu dopadu. Při experimentálním měření bylo zjištěno, že při úhlu dopadu větším než 30° vzniká velká odchylka. Je to způsobeno zrcadlovým odrazem, nedostatečnou propustností horní vrstvy a vlivem cloněním a polarizací okraje fotočlánku obrubou. Tato úhlová chyba se odstraňuje pomocí kosinového nástavce, který má tvar kulového vrchlíku a je vyroben z rozptylového skla [29].



Obrázek 20 Procentuální směrová chyba fotočlánků [29]

1. Fotočlánek s přečnívající obrubou.
2. Fotočlánek bez obruby.
3. Fotočlánek s korekčním filtrem.
4. Fotočlánek s kosinovým nástavcem.

Dělení fotočlánků podle přesnosti

- Přesná -
U těchto fotočlánků je odhad rozšířené nejistoty $U(\%)$ menší než 80%. Používají se při měření etalonů, kalibraci přístrojů a laboratorním měření.
- Provozní
Rozšířená nejistota je v rozmezí $U=8-14\%$. Používají pro ověřování parametrů světelných zdrojů, svítidel a osvětlovacích soustav.
- Orientační -
Zde se pohybuje nejistota měření v rozmezí $U=14-20\%$. Používají se při kontrole funkce osvětlovacího zařízení [22].

Základním etalonem pro fotometrické veličiny je etalon svítivosti, který je odvozen na národní úrovni v Měrovém středisku mezinárodní laboratoře ve Francii.

4.2 Měřicí přístroje

4.2.1 Luxmetry

Luxmetr je přístroj pro měření osvětlení. Skládá se z přijímače s fotočlánkem a vyhodnocovacího systému. Fotoproud, vznikající osvětlením fotodiody, se zesílí operačním zesilovačem. Fotočlánek luxmetru je opatřen kosinovým nástavcem. Vyhodnocovací obvod je napojen na digitální nebo analogový indikátor s korektorem pro nastavení nuly. Luxmetry se rozdělují podle přesnosti do jednotlivých tříd, znázorněných v tabulce č.10.

Třída přesnosti	f_c [%]	Využití
L	2	Měření etalonů
A	5	Přesná laboratorní měření
B	10	Běžné měření osvětlenosti
C	20	Orientační měření

Tabulka 10 Rozdělení luxmetrů podle přesnosti [22], [23]

kde f_c značí největší dovolenou souhrnnou chybu v procentech

Některé luxmetry mají vlastní napájecí zdroj, u kterého musí být přítomna možnost kontroly napájecího napětí. Každý luxmetr musí snést přetížení 20% z měřicího rozsahu po dobu nejméně 5 minut. Za příznivých podmínek se životnost luxmetru pohybuje kolem 5000 provozních hodin. Dále musí splňovat všechny třídy luxmetrů frekvenční rozsah od 40Hz do 1Mhz. Při měření je důležité nechat fotočlánek luxmetru se stabilizovat daným podmínkám. V praxi stačí ponechat odkrytý luxmetr 5-15 minut v osvětleném prostředí, kde bude probíhat měření [29].

Během provozu luxmetrů dochází ke změně vlastností daného fotočlánku a proto je nutné provádět pravidelné kalibrace. Kalibrace luxmetrů pro přesná měření se musí provádět každé dva roky, pro provozní měření každé tři roky a pro orientační měření každých pět let.

Měření luxmetry doprovází mnoho chyb. Jedná se především o chybu spektrální, úhlovou, směrovou, odchylky spektrální citlivosti čidla od křivky $V(\lambda)$ a chybou linearity. U luxmetrů, které jsou konstruovány jako fotočlánek, připojený přes kabel k vlastnímu měřicímu přístroji, je nutnost kvalitního stínění propojovacího kabelu, aby nedocházelo k nežádoucímu rušení.

U kompaktních luxmetrů, které mají fotodetektor a elektroniku v jednom pouzdře, musí mít možnost dálkové fixace naměřené hodnoty, protože přítomnost pracovníka by mohla ovlivnit samotné měření. Pokud tyto luxmetry nejsou tímto způsobem upraveny, mohou sloužit pouze k orientačnímu měření.

Některé univerzální laboratorní luxmetry mají jednotlivé čidla pro měření v určitém spektru (UV), fotočlánky s kosinovým nástavcem pro měření horizontální osvětlenosti a nebo speciálními nástavce s fotonkami pro měření střední poloválcové, válcové a kulové osvětlenosti [29].



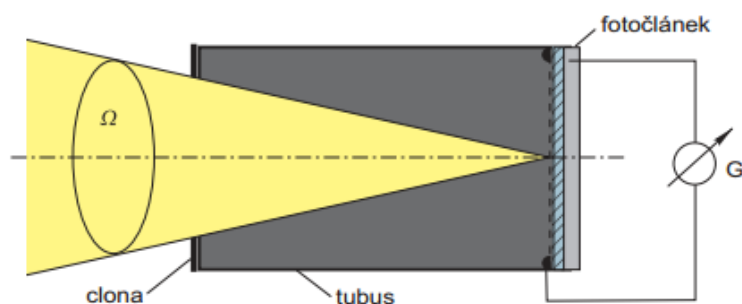
Obrázek 21 Digitální luxmetr PRC

Zásady měření osvětlenosti

- Nové zářivky musí před měřením odsvitit minimálně 100 hodin, žárovky 6 hodin. Důvodem je pokles světelného toku zdroje během jeho stárnutí.
- Dostatečné zahoření výbojových zdrojů.
- Fotočlánky je potřeba před měřením nechat 5-15 minut osvětlené měřeným zdroje světla.
- Světelný tok je u světelných zdrojů teplotně závislá veličina a proto je nutné udávat k výsledkům měření okolní parametry.
- Během měření je nutno sledovat napájecí napětí. V případě odlišné velikosti napájecího napětí musíme provést korekci korekčním činitelem k_U , který závisí na exponentu c , který poskytuje výrobce světelného zdroje [29].

4.2.2 Jasoměry a jasové analyzátory

Jasoměr je elektrické zařízení, které slouží k měření jasu. Skládají se z fotočlánku, optického systému pro vyhodnocení prostorového úhlu, měřicího a vyhodnocovacího systému. Optický systém pro vyhodnocení prostorového úhlu se skládá ze soustavy clonících a fokusačních prvků. Fotočlánek měří normálovou osvětlenost a jas se vypočítá podle rovnice č.11 [31], [32]. Na obrázku č.13 je zobrazeno schéma objektivového jasoměru.



Obrázek 22 Schéma objektivového jasoměru [31]

Podle zorného pole optického systému rozdělujeme jasoměry na bodové a integrační. Bodové jasoměry dokážou měřit velmi malé plochy (pod úhlem 6'). Integrační jasoměry měří větší plochy (pod úhlem 2°). Podle přesnosti rozdělujeme jasoměry pro přesné měření s chybou $\pm 7,5\%$ a pro provozní měření s chybou $\pm 10\%$ [29].

Jasový analyzátor má navíc softwarovou úpravu podle křivky spektrální citlivosti normalizovaného pozorovatele jako to mají digitální fotoaparáty [1].



Obrázek 23 Jasoměr L1009 [29]

4.2.3 Spektroradiometry

Spektrofotometr slouží k měření spektra viditelného záření. Využívá rozkladu světla na hranolu nebo světelné mřížky. Jednotlivé složky dopadají na snímací čip, který předává informace do procesoru. Mimo spektrum dokáže měřit i jas, osvětlenost, náhradní teplotu chromatičnosti, index podání barev a trichromatické souřadnice.



Obrázek 24 Spektroradiometr CS-1000A [33]

4.2.4 Kulový integrátory

Kulový integrátor se často nazývá fotometrický integrátor, kulový integrátor nebo Ulbrichtova koule. Jedná se o fotometrický přístroj, ve kterém se měří celkový světelný tok světelného zdroje umístěného ve středu duté koule, která má vnitřní stranu natřenou bílou barvou s vysokým rozptylem, odrazivostí a trvanlivostí. Povrch musí být také barevně neselektivní.

Koule je navržena tak, aby se dala snadno otevřít a vyměnit světelný zdroj za jiný. V kouli jsou přítomny dvě clony. Jedna pro měřicí fotočlánek a druhá pro korekční žárovku, která se využívá při měření světelné účinnosti svítidel [34].



Obrázek 25 Kulový integrátor [34]

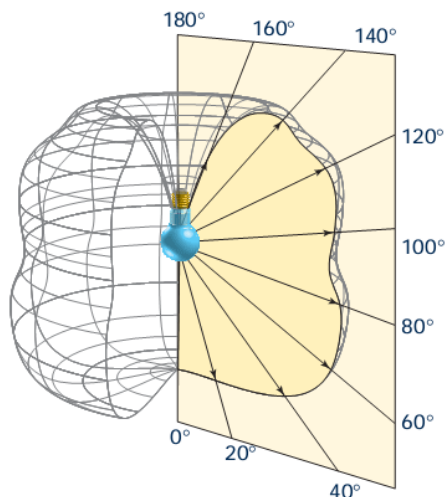
Pro stanovení korekčního činitele k se provádí dvě měření. První měření světelného toku bez svítidla a druhé měření se svítidlem. Koeficient k je poměr světelnému toku bez svítidla ku světelnému toku s přítomným svítidlem a vyjadřuje míru pohltivosti materiálů použitých ve svítidle.

V kulovém integrátoru se měří velikost osvětlení, která se následně musí přepočítat pomocí koeficientu K_{KI} , nebo pokud je fotočlánek připojen na zesilovač s voltmetrem, tak s koeficientem celého systému K_{MS} (lm/V). Rozměry kulových integrátorů se pohybují v rozmezí 0,2m až do 3m. V menších kulových integrátorech se měří LED světelné zdroje a v největších se měří svítidla o délce až 2m.

4.2.5 Goniofotometry

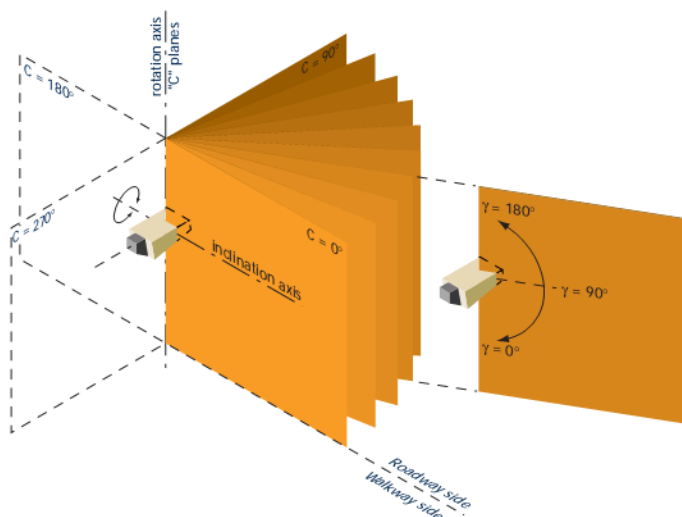
Goniofotometr je laboratorní měřicí přístroj, který měří prostorové rozložení svítivosti. Přístroj musí být konstruován tak, aby mohl měřit v různých rovinách a pod různými úhly.

Měření svítivosti se provádí ve všech bodech prostoru a vynesení těchto vektorů se získá prostorové rozložení svítivosti zdroje. Toto zobrazení není příliš praktické a využívá se proto jednotlivých řezů tohoto prostoru. Na obrázku č.17 je zobrazena křivka svítivosti v polorovině fotometrického prostoru.



Obrázek 26 Křivka svítivosti vyznačená v polorovině fotometrického prostoru [35]

Nejčastěji se používá systém rovin C- γ , kde C značí úhel od hlavní osy. V těchto polorovinách dostáváme křivky svítivosti standardně v polárních souřadnicích, kde se úhel značí řeckým písmenem γ a v praxi se používá krok 5°. Hlavní osa je v tomto systému kolmá k vyzařovací ploše svítidla a od této osy se počítají úhly jednotlivých polorovin s nejčastějším krokem 15°.



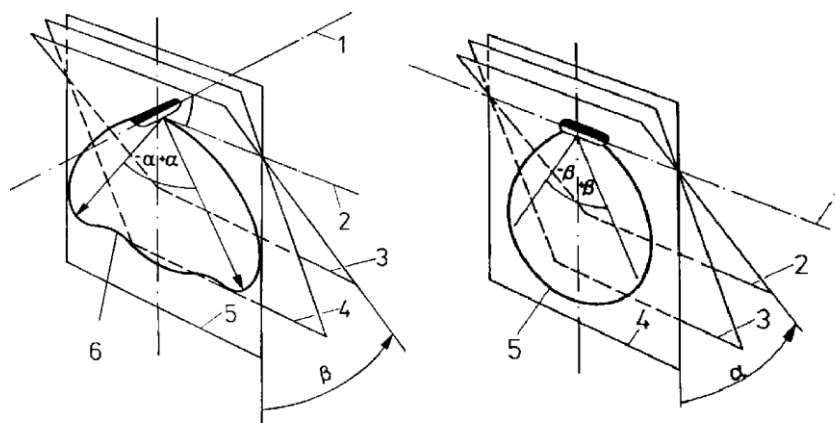
Obrázek 27 Systém rovin C- γ [35]

V tabulce č.11 jsou minimální počty měření svítivosti pro systém C- γ , kde mají jednotlivé poloroviny krok 15° a úhel γ má krok 5°.

Druh osvětlení	Počet úhlů γ	Počet polorovin	Minimální počet měření
Dolní polorovina	36	24	409
2 osy symetrie	18	7	120
Kruhově symetrické svítidlo	18	1	18
Bodový zdroj	1	1	1

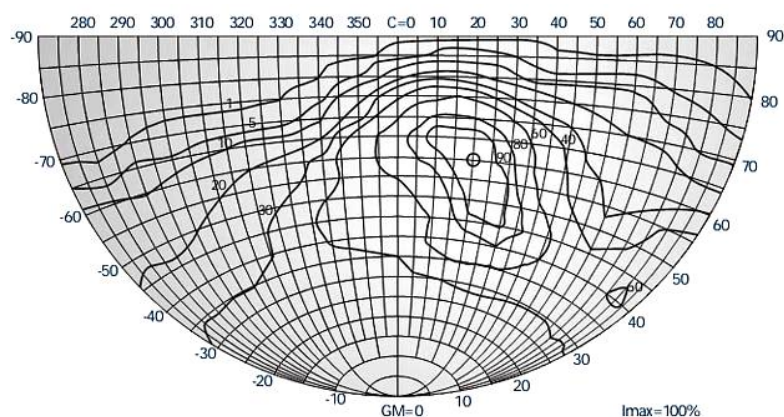
Tabulka 11 Minimální počet měření v systému C- γ

Dále se používají systémy A- α a B- β s příčnou osou svítidla.



Obrázek 6 Systémy A- α a B- β polorovin [36]

Poslední zobrazení rozložení svítivosti je pomocí jednotkové koule. Nejčastěji se používá polokoule se sinusoidálním zobrazením. Body s danou velikostí jsou zobrazeny pomocí rovnoběžek a poledníků a jsou spojeny do izokandely. Izokandela je křivka o stejné hodnotě svítivosti.



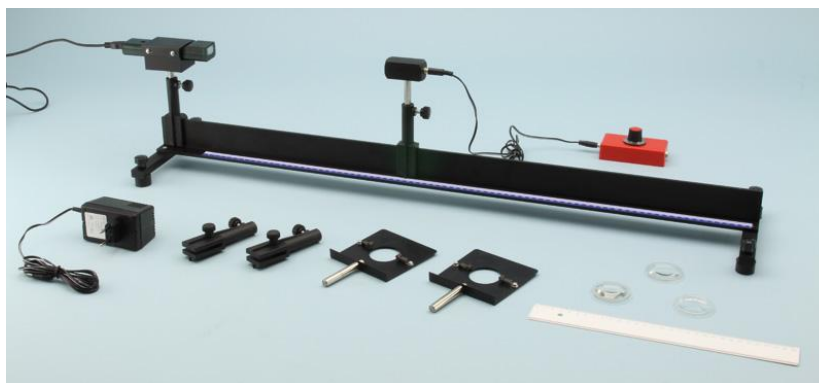
Obrázek 28 Izokandelový diagram v sinusoidálním zobrazení [35]

Konstrukční řešení goniometrů

1. Otočný zdroj nebo svítidlo s pevně umístěným fotočlánkem.
2. Pevně umístěný zdroj nebo svítidlo a otočný fotočlánek.
3. Pevně umístěný zdroj i fotočlánek s otočným zrcadlem.

4.2.6 Fotometrická lavice

Fotometrická lavice je laboratorní přístroj sloužící k měření svítivosti. Umožňuje porovnání svítivosti světelných zdrojů a lze na ní ověřovat přesnost fotočlánků. Skládá se ze dvou vodících tyčí, po kterých se pohybuje posuvný nástavec, na který se připevňuje světelný zdroj.



Obrázek 29 Fotometrická lavice [37]

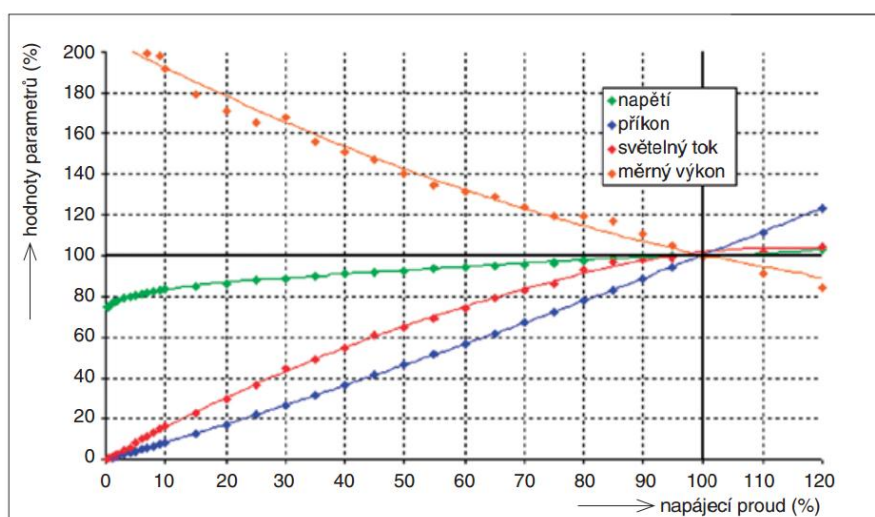
Světelný zdroj a laboratorní luxmetr se umístí do optické osy. Změří se hodnota osvětlení a pomocí čtvercového zákona se dopočítá svítivost. Fotometrické lavice jsou dlouhé 3 až 8 metrů. Vodicí lišta má rastr pro měření vzdálenosti s přesností až 0,5mm [37].

5 KŘÍŽOVÉ CHARAKTERISTIKY

Křížové charakteristiky popisují průběhy světelných a elektrických parametrů světelných zdrojů při změně napájecího napětí. Veličiny se vynášejí v procentech nominálních hodnot. Charakteristika má čtyři kvadranty se středem ve 100% obou os. Měřené veličiny jsou nejčastěji:

- Celkový odebíraný proud, který je nutno měřit přístroji s podporou měření efektivní hodnoty proudu trueRMS.
- V případě měření výbojek se měří napětí na výboji U_o , které se měří voltmetrem s dostatečně velkým vstupním odporem, aby nesnižoval stabilitu oblouku a musí být vysoce napěťově odolný.
- Činný výkon P , který odebírá světelný zdroj s předřadníkem. U žárovky se činný výkon rovná příkonu zdroje. Použitý přístroj musí měřit trueRMS efektivní hodnoty proudu.
- Světelný tok Φ se měří v kulovém integrátoru, u kterého musíme znát přepočítávací konstantu k (lm/V).
- Měrný výkon M_z světelného zdroje se určí jako podíl celkového světelného toku a činného příkonu.
- Účinnost světelného zdroje η , která se spočítá jako podíl činného výkonu světelného zdroje a součtu celkového příkonu zahrnujícího ztráty v předřadníku.
- Celkový účinek odběru λ , který udává velikost činného výkonu z příkonu zdánlivého.
- Teplota chromatičnosti nebo náhradní teplota chromatičnosti [38].

Na obrázku č.21 je zobrazena křížová charakteristika LED diody Nichia NGPLR70



Obrázek 30 Křížová charakteristika LED diody Nichia NGPLR70 [39]

Z křížové charakteristiky diody je patrné, že při menším napětí pracují LED diody s vyšším měrným výkonem. Při napájení 20% jmenovitého napětí má daná světelná dioda nárůst měrného výkonu o 180%.

6 ZÁVĚR

Tato práce byla vytvořena za účelem popsat parametry světelných zdrojů a způsobů jejich měření v praxi. Dnešní trh nabízí velké množství typů světelných zdrojů a proto je nutné tyto zdroje posoudit v laboratorních podmínkách z kvantitativního a kvalitativního hlediska.

Zastaralé tepelné žárovky se svojí nízkou účinností byly nahrazeny kompaktními zářivkami a výbojkami, které mají podstatně vyšší světelnou účinnost, ale ze sítě neodebírají harmonický průběh proudů. U výrobců je vidět snaha o jistou korekci odebíraného proudu, ale pouze u dražších produktů.

V dnešní době se nejrychleji vyvíjejí LED světelné zdroje, které nabízí velice dobrou účinnost i kvalitu světla. Navíc mají dlouhou životnost a podporují stmívání. Cena těchto zdrojů je prozatím pro širší využití stále moc vysoká. Navíc LED zdroje nedosahují velkých výkonů a kvůli jejich zahřívání a je nutné je dostatečně chladit. V blízké budoucnosti lze očekávat značný nárůst výkonu světelných diod a snížení jejich výrobních nákladů díky masové výrobě.

Při měření parametrů světelných zdrojů je důležitá jejich závislost na napájecím napětí. Tyto charakteristiky se označují jako křížové. Obě osy křížové charakteristiky znázorňují procentuální nárůst nebo pokles jmenovitých hodnot, přičemž se obě osy protínají ve 100%. V laboratorním měření byly tyto charakteristiky proměřeny pro klasickou, halogenovou žárovku, kompaktní zářivku, indukční zářivku a LED žárovku.

Z laboratorního měření bylo zjištěno, že světelný tok exponenciálně klesá s napájecím napětím u všech těchto světelných zdrojů s výjimkou LED žárovky, kde je tato závislost lineární. LED žárovka provozována při nižší napájecí hladině má vyšší účinnost přeměny světelné energie, takže z hlediska úspor elektrické energie by se je vyplatilo provozovat při nižší hodnotě napájení. Při vyšší hodnotě napájení naopak jejich světelná účinnost klesá. Dále bylo zjištěno, že u indukční zářivky je z hlediska nejvyšší světelné účinnosti napájet nejvýhodnější napájet tento světelný zdroj přibližně polovičním napětím než je napětí nominální.

Průběhy odebíraných proudů žárovek s wolframovým vláknem je harmonické průběhu. Jedna je tedy o čistě odporovou zátěž. Světelné zdroje s předřadníky, které startují a udržují elektrický oblouk uvnitř zdroje, mají značně neharmonický průběh odebíraného proudu kapacitního charakteru. Při snižování napájecího napětí odebírá předřadník stále větší proudy, aby udržel elektrický oblouk. Nicméně přibližně při polovičním hodnotě nominálního napětí oblouk zcela zaniká. U všech zdrojů byly zpracovány křížové charakteristiky, průběhy odebíraných proudů spolu s vypočítaným spektrem, kde nás především zajímají liché harmonické složky, pro něž existují maximální přípustné hodnoty, které jsou stanovené normou o odebíraných prouděch elektrických spotřebičů.

6.1 Přínos práce

Tato práce vysvětluje jednotlivé provozní parametry světelných zdrojů a v několika přehledných tabulkách obsahuje jednotlivé rozsahy těchto parametrů. Dále se zabývá, jak se tyto parametry měří v praxi. V laboratorních podmínkách byly proměřeny křížové charakteristiky některých typů světelných zdrojů, aby bylo zjištěno při jakém napájecím napětí je nejvýhodnější tyto zdroje provozovat. Dále byly pro představu proměřeny průběhy a spektra odebíraných proudů těchto světelných zdrojů.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] SOKANSKÝ, Karel, Tomáš NOVÁK, Marek BÁLSKÝ, Zdeněk BLÁHA, Zbyněk CARBOL, Daniel DIVIŠ, Blahoslav SOCHA, Jaroslav ŠNOBL, Jan ŠUMPICH a Petr ZÁVADA. *Světelná technika*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 255 s. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [2] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Světlo* [online]. c2013 [citováno 11. 12. 2013]. Dostupný z WWW:
<<http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Sv%C4%9Btlo&oldid=10757855>>
- [3] KREJČÍ, Robert a Eduard HULICIUS. Microdesignum: Polovodičové lasery a LED-ky. [online]. 23.04.2007 [cit. 2013-12-11]. Dostupné z:
<http://www.microdesignum.cz/clanky/Polovodicove-lasery-a-LED-ky.html>
- [4] MIŠKAŘÍK, Stanislav. *Elektrické zdroje světla (učební texty)*. Praha: LUMAX, 1992, 117 s. KREJČÍ, Robert a Eduard HULICIUS. Microdesignum: Polovodičové lasery a LED-ky. [online]. 23.04.2007 [cit. 2013-12-11]. Dostupné z:
<http://www.microdesignum.cz/clanky/Polovodicove-lasery-a-LED-ky.html>
- [5] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Hvězda* [online]. c2013 [citováno 11. 12. 2013]. Dostupný z WWW:
<<http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Hv%C4%9Bzda&oldid=10762374>>
- [6] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Wienův posunovací zákon* [online]. c2013 [citováno 26. 03. 2014]. Dostupný z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Wien%C5%AFv_posunovac%C3%AD_z%C3%A1kon&oldid=11008568>
- [7] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Světelný zdroj* [online]. c2014 [citováno 26. 03. 2014]. Dostupný z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Sv%C4%9Bteln%C3%BD_zdroj&oldid=11229647>
- [8] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Radiometrické veličiny* [online]. c2013 [citováno 11. 12. 2013]. Dostupný z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Radiometrick%C3%A9_veli%C4%8Diny&oldid=10915222>
- [9] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Fotometrické veličiny* [online]. c2013 [citováno 11. 12. 2013]. Dostupný z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Fotometrick%C3%A9_veli%C4%8Diny&oldid=10690717>
- [10] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Prostorový úhel* [online]. c2013 [citováno 11. 12. 2013]. Dostupný z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Prostorov%C3%BD_%C3%BAhel&oldid=10290670>
- [11] DOBROTINŠKA, Leona. Fosilum: iilumination-lux. [online]. 2010 [cit. 2013-12-11]. Dostupné z: <http://www.fosilum.si/en/why-led-lights/iilumination-lux/>

- [12] MICHL, Beneš. Gigalighting: Parametry světelných zdrojů. [online]. 2013 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: <http://www.gigalighting.cz/parametry-svetelnych-zdroju.htm>
- [13] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Barevná teplota* [online]. c2013 [citováno 11. 12. 2013]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Barevn%C3%A1_teplota&oldid=10610856>
- [14] Esolite: Barevná teplota a index Ra. [online]. [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: <http://www.esolite.com/barevna-teplota-a-index-ra>
- [15] *Smdledzarovky: Index podání barev* [online]. [cit. 2014-03-26]. Dostupné z: <http://www.smdledzarovky.cz/content/22-index-podani-barev>
- [16] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Halogenová žárovka* [online]. c2013 [citováno 11. 12. 2013]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Halogenov%C3%A1_%C5%BE%C3%A1rovka&oldid=10057459>
- [17] TRUSTIA. Svitidla-deltalight: LED svítidla - nové trendy ve světelných zdrojích. [online]. 2011 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: <http://www.svitidla-deltalight.cz/clanky/led-svitidla-nove-trendy-ve-svetelnych-zdrojich>
- [18] Fotonmag: Měrný výkon světelných zdrojů aneb účinnost podruhé. [online]. 28.12.2007 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: <http://www.fotonmag.cz/osvetleni/merny-vykon-svetelnych-zdroju-aneb-ucinnost-podruhe/>
- [19] STAPLEHURST, John. UNIVERSITY OF EXETER. *Strandarchive: lantern* [online]. [cit. 2014-04-02]. Dostupné z: <http://www.strandarchive.co.uk/index.shtml>
- [20] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Elektronický předřadník* [online]. c2014 [citováno 31. 03. 2014]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Elektronick%C3%BD_p%C5%99ed%C5%99adn%C3%ADk&oldid=11099551>
- [21] FCC PUBLIC S.R.O. *Odbornecasopisy: Svetlo* [online]. 2013. vyd. [cit. 2014-04-02]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Svetlo/2013/02/Svetlo_02_2013_output/web/Svetlo_02_2013_opf_files/WebSearch/page0022.html
- [22] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Patice* [online]. c2013 [citováno 11. 12. 2013]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Patice&oldid=9953676>>
- [23] OMAL: Typy a značení patic u LED žárovek. [online]. [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: <http://www.omal.cz/typy-a-znaceni-patic>
- [24] Svitidlaosvetleni: Typy světelných zdrojů. [online]. [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: <http://svitidlaosvetleni.com/info/13-typy-svetelnych-zdroju>

- [25] FK TECHNICS. Fktechnics: Životnost LED zdrojů světla - střední doba života. [online]. 15..11.2010 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: http://www.fktechnics.cz/cz/art_144/zivotnost-led-zdroju-svetla-stredni-doba-zivota.aspx
- [26] ANDĚL, Vladimír. VA ELEKTRONIK. *Vaelektronik: Chlazení LED a účinnost* [online]. [cit. 2014-04-02]. Dostupné z: http://vaelektronik.cz/led_chlaz.html
- [27] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Fotočlánek* [online]. c2013 [citováno 11. 12. 2013]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Foto%C4%8Dl%C3%A1nek&oldid=9863632>
- [28] Taw: fotovoltaika solarni systemy. [online]. 2013 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: <http://www.taw.cz/index.php/fotovoltaika-solarni-systemy.html>
- [29] HABEL, Jiří. Světlo: Základy světelné techniky. 2013, roč. 2009, č. 3, s. 44-48. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39195.pdf>
- [30] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Luxmetr* [online]. c2013 [citováno 11. 12. 2013]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Luxmetr&oldid=10193404>
- [31] CARBOL, Zbyňek a Tomáš NOVÁK. Měření světelných zdrojů: Měření parametrů moderních světelných zdrojů a svítidel. s. 39-41. Dostupné z: http://www.elektroatrh.cz/pdf/mereni_parametru_modernich_svetelnych_zdroju_a_sv_itidel.pdf
- [32] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Jasoměr* [online]. c2009 [citováno 11. 12. 2013]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Jasom%C4%9Br&oldid=3557032>
- [33] UEEN. *.ueen.feec.vutbr: laboratoř světelné techniky* [online]. 2006 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: <http://www.ueen.feec.vutbr.cz/light-laboratory/?section=about>
- [34] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Kulový integrátor* [online]. c2013 [citováno 11. 12. 2013]. Dostupný z WWW: http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Kulov%C3%BD_integr%C3%A1tor&oldid=9863684
- [35] EDVARD. Electrical-engineering-portal: Luminous Measurement Graphic Representation. [online]. 16.1.2012. [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: <http://electrical-engineering-portal.com/luminous-measurement-graphic-representation>
- [36] Cd3wd: Lighting Installation - Basic vocational knowledge. [online]. [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: http://www.cd3wd.com/cd3wd_40/cd3wd/ELECTRIC/GTZ024E/EN/B609_4.HTM
- [37] Edumad: components. [online]. [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: http://www.edumad.it/en/components/com_virtuemart/shop_image/product/8405_Banco_optic_4f0bfb17d702c.jpg

- [38] UEEN. *ueen.feec.vutbr: Úlohy do laboratorních cvičení* [online]. 2011 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: http://www.ueen.feec.vutbr.cz/light-laboratory/files/sylabus/14_Provozni_vlastnosti_svetelnych_zdroju.pdf
- [39] KRBAL, Michal a Petr BAXANT. Světlo: Statistické hodnocení vlastností světelných zdrojů. 2013, roč. 12, č. 1, s. 48-50. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/43029.pdf>

PŘÍLOHA A

LABORATORNÍ MĚŘENÍ

MĚŘENÍ KŘÍŽOVÝCH CHARAKTERISTIK A PRŮBĚHŮ ODEBÍRANÉHO PROUDU SVĚTELNÝCH ZDROJŮ

1 MĚŘENÍ KŘÍŽOVÝCH CHARAKTERISTIK SVĚTELNÝCH ZDROJŮ A PRŮBĚHU ODEBÍRANÉHO PROUDU

Křížové charakteristiky popisují změny provozních parametrů světelných zdrojů při změně napájecího napětí. V případě svítivých diod, kdy se používá proudového zdroje, je vhodné sestavit křížové charakteristiky i v závislosti na změně napájecího proudu. Na svislé ose jsou zobrazeny ustálené hodnoty v procentuální hodnotě vůči hodnotě nominální.

Osy charakteristiky se nacházejí ve 100% a rozdělují charakteristiku na 4 kvadranty. V prvním kvadrantu jsou měřené parametry vyšší než nominální při vyšší hodnotě napájecího napětí. V druhém kvadrantu jsou parametry vyšší při menší hodnotě napájení. V třetím kvadrantu jsou parametry menší při menší hodnotě napájení. Hodnoty ve čtvrtém kvadrantu se nevyskytují.

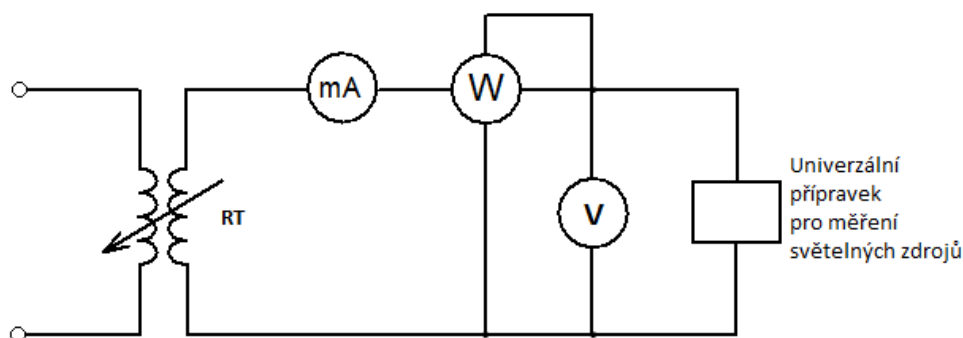
Nejdůležitějším parametrem v křížové charakteristice je celkový světelný tok světelného zdroje. Měření tohoto parametru je velice obtížné, protože okolní zdroje světelného záření způsobují značnou chybu měření.

Prvním řešením je měření v kulovém integrálu, který obklopuje světelný zdroj a zabraňuje okolnímu záření ovlivnit přesnost měření. Druhý, v této situaci vhodnější způsob, je měření změny intenzity osvětlení v uzavřeném prostoru. Naměřené hodnoty jsou porovnávány s nominálními a vyjádřeny v procentech, proto si můžeme dovolit měřit místo světelného toku intenzitu osvětlení. Další výhodou tohoto měření je, že se konstantní chyba během měření, způsobena okolním osvětlením, při výpočtech vyloučí.

Dalším zkoumaným parametrem byl průběh odebíraného proudu světelných zdrojů. K zobrazení průběhů odebíraného proudu byl použit osciloskop Tektronix TPS 2014. Naměřené hodnoty z osciloskopu byly exportovány a dále zpracovány na počítači.

2 ZAPOJENÍ PRACOVISTĚ

Měření bylo provedeno v laboratoři světelné techniky. V této laboratoři jsou zatemněná okna a všechny povrchy jsou pokryty světelně absorpčními materiály pro eliminaci světelných odrazů v laboratoři.



Obrázek 31 Zapojení pracoviště pro měření křížových charakteristik

3 KLASICKÁ ŽÁROVKA

Klasická žárovka představuje čistě odporovou zátěž. S rostoucí hodnotou napájení se zvyšuje velikost procházejícího proudu wolframovým vláknem, který zvýší velikost světelného toku a teploty chromatičnosti. Odebíraný proud žárovky je harmonického průběhu ve fázi s napětím. Pro proměření těchto vlastností byla zvolena klasická žárovka značky Phillips.

3.1 Parametry klasické žárovky Phillips

- Výrobce Phillips
- Typ klasická žárovka
- Příkon 42 W
- Světelný tok 630 lm
- Měrný výkon 15 lm/W
- Teplota chromatičnosti 2800 K
- Index podání barev 100
- Nominální napětí 230 V
- Patice E27
- Baňka A55 čirá
- Životnost 2000 h
- Délka 96 mm
- Průměr 55 mm



Obrázek 32 Měřená klasická žárovka Phillips 42 W

3.2 Tablka naměřených hodnot

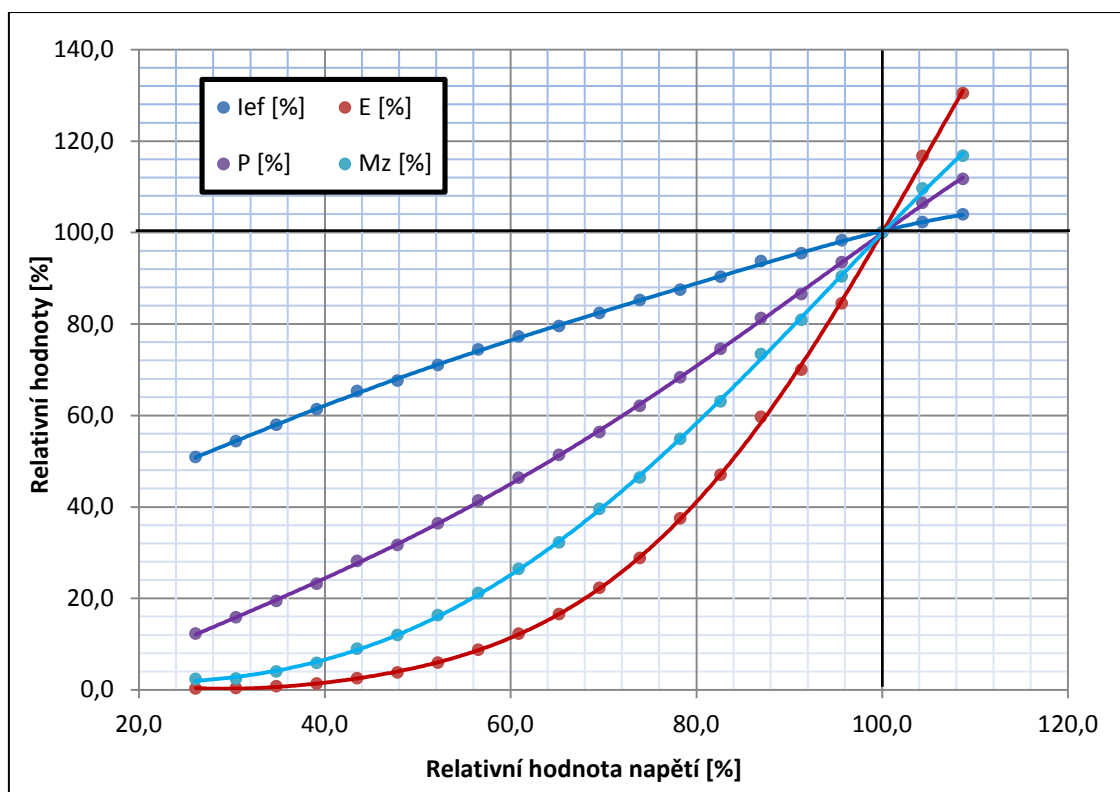
U_{ef} [V]	I_{ef} [mA]	E [lx]	T [K]	P [W]	U_{ef} [%]	I_{ef} [%]	E [%]	T [%]	P [%]	M_z [%]
60	89,6	0,3	-	4,9	26,1	50,9	0,3	-	12,3	2,4
70	95,7	0,4	-	6,4	30,4	54,4	0,4	-	15,9	2,5
80	102,0	0,8	-	7,8	34,8	58,0	0,8	-	19,4	4,0
90	108,0	1,4	-	9,3	39,1	61,4	1,4	-	23,2	5,9
100	115,0	2,6	-	11,3	43,5	65,3	2,5	-	28,2	9,0
110	119,0	3,9	-	12,7	47,8	67,6	3,8	-	31,7	12,0
120	125,0	6,1	-	14,6	52,2	71,0	5,9	-	36,4	16,3
130	131,0	9,0	-	16,6	56,5	74,4	8,8	-	41,4	21,2
140	136,0	12,6	-	18,6	60,9	77,3	12,3	-	46,4	26,5
150	140,0	17,0	2309	20,6	65,2	79,5	16,6	85,6	51,4	32,2
160	145,0	22,9	2358	22,6	69,6	82,4	22,3	87,4	56,4	39,6
170	150,0	29,6	2407	24,9	73,9	85,2	28,8	89,2	62,1	46,4
180	154,0	38,5	2461	27,4	78,3	87,5	37,5	91,2	68,3	54,9
190	159,0	48,3	2511	29,9	82,6	90,3	47,0	93,1	74,6	63,1
200	165,0	61,3	2567	32,6	87,0	93,8	59,7	95,1	81,3	73,4
210	168,0	71,9	2606	34,7	91,3	95,5	70,0	96,6	86,5	80,9
220	173,0	86,8	2655	37,5	95,7	98,3	84,5	98,4	93,5	90,4
230	176,0	102,7	2698	40,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
240	180,0	119,9	2735	42,7	104,3	102,3	116,7	101,4	106,5	109,6
250	183,0	134,0	2765	44,8	108,7	104,0	130,5	102,5	111,7	116,8

3.3 Použité měřicí přístroje

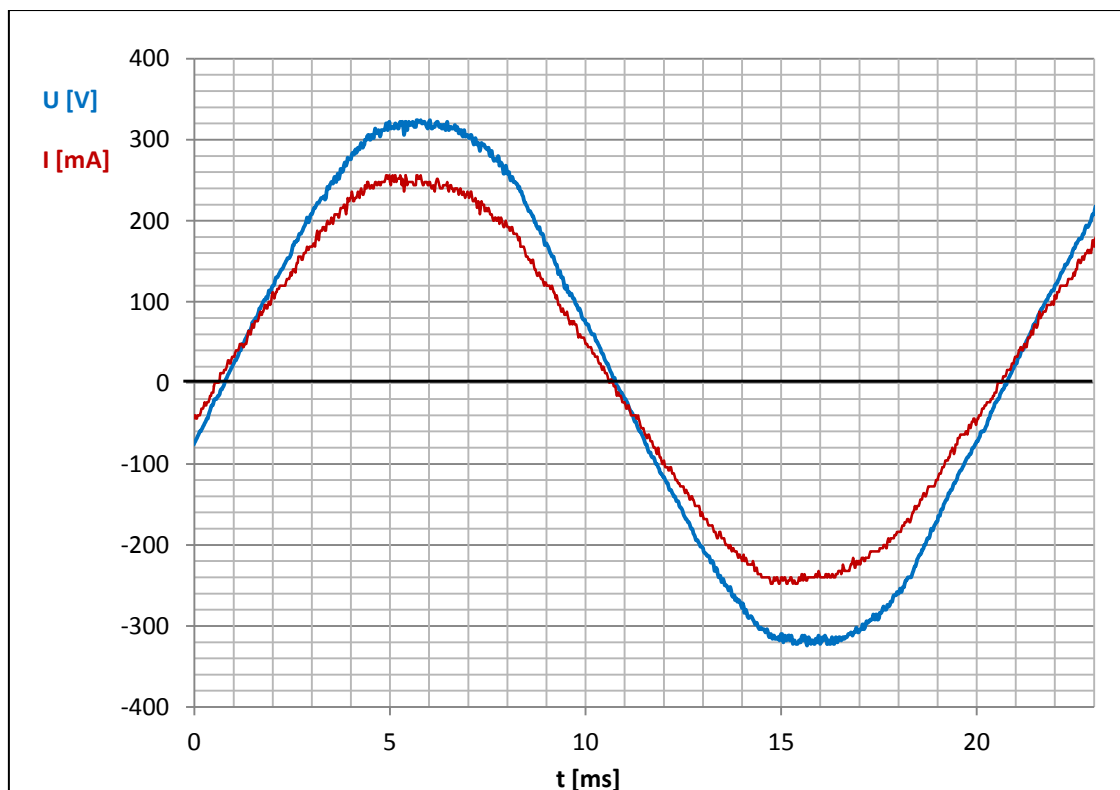
Typ	Výrobce	Označení	Výrobní číslo	Přesnost	Rozsah
Regulovatelný transformátor	Metra Blansko				0-230V; 10A
Multimetr	Unitest Hexagon	320	7333081	$\pm 0,6\%$ ± 3 dig	
Indukční kleště	Chauvin Arnoux	C173	142697		0,001-1200A
Osciloskop	Tektronix	TPS2014			100-240VAC
Chroma metr	Konica Minolta	CL-200	76631127	$\pm 2\%$ ± 1 dig	0,1-99900 lx

3.4 Křížová charakteristika

$$I_{ef} = f(U); E = f(U); P = f(U); M_z = f(U)$$



3.5 Průběh odebíraného proudu



3.6 Zhodnocení měření

Měření prokázalo, že průběh světelného toku má exponenciální závislost na velikost napájecího napětí. S rostoucím proudem se wolframové vlákno zahřívá a to má za následek i zvýšení velikosti teploty chromatičnosti. Z křížové charakteristiky je patrné, že tato závislost je lineární. Účinnost přeměny světelné energie výrazně roste s rostoucím napájecím napětím (teplotou wolframového vlákna). Příkon zdroje není přímo lineární z důvodu teplotní závislosti odporu wolframového vlákna.

Pokud snížíme velikost napájecího napětí žárovky přibližně o 30%, poklesne celková hodnota světelného toku na 22%, teplota chromatičnosti na 87,5% a světelná účinnost na 40% nominální hodnoty. Naopak při zvýšení napětí o 10% se zvýší světelný tok o více než 30%, teplota chromatičnosti 3% a světelná účinnost o 17%.

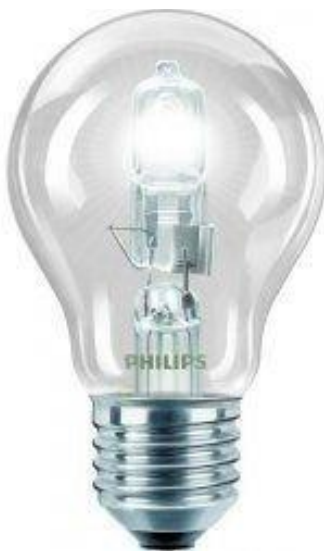
Průběh odebíraného proudu je harmonického průběhu a ve fázi s napětím. To potvrzuje, že je žárovka čistě lineární odporová zátěž.

4 HALOGENOVÁ ŽÁROVKA

Vlákno halogenidové žárovky dosahuje vyšší teploty než u klasických žárovek. To má za následek vyšší teplotu chromatičnosti a světelné účinnosti. Halogenová žárovka představuje čistě lineární odpor a odebíraný proud by měl harmonického průběhu a ve fázi s napětím. Při měření byla použita halogenová žárovka značky Phillips o příkonu 60 W.

4.1 Parametry halogenové žárovky

- Výrobce Phillips
- Typ halogenová žárovka
- Příkon 60 W
- Světelný tok 710 lm
- Měrný výkon 11,8 lm/W
- Teplota chromatičnosti 2800 K
- Index podání barev 100
- Nominální napětí 230 V
- Patice E27
- Baňka A55 čirá
- Životnost 1000 h
- Délka 96 mm
- Průměr 55 mm



Obrázek 33 měřená halogenová žárovka Phillips 60 W

4.2 Tabulka naměřených hodnot

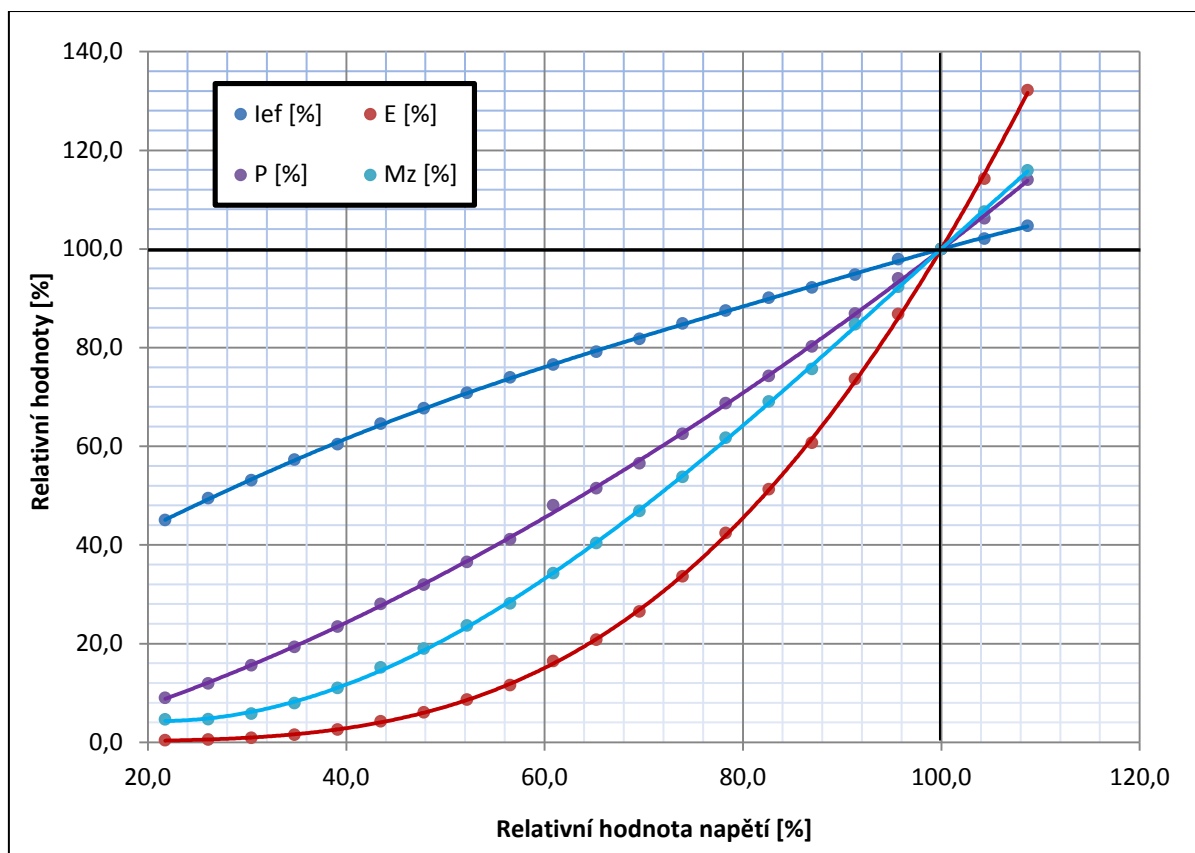
U_{ef} [V]	I_{ef} [mA]	E [lx]	T [K]	P [W]	U_{ef} [%]	I_{ef} [%]	E [%]	T [%]	P [%]	M_z [%]
50	86,5	0,6	-	3,92	21,7	45,1	0,4	-	9,0	4,6
60	95	0,8	-	5,19	26,1	49,5	0,6	-	11,9	4,7
70	102	1,3	-	6,79	30,4	53,1	0,9	-	15,6	5,8
80	110	2,2	-	8,41	34,8	57,3	1,5	-	19,3	7,9
90	116	3,7	-	10,2	39,1	60,4	2,6	-	23,4	11,0
100	124	6,1	-	12,2	43,5	64,6	4,3	-	28,0	15,2
110	130	8,7	-	13,9	47,8	67,7	6,1	-	32,0	19,0
120	136	12,4	2326	15,9	52,2	70,8	8,7	80,9	36,6	23,7
130	142	16,6	2372	17,9	56,5	74,0	11,6	82,5	41,1	28,2
140	147	23,6	2435	20,9	60,9	76,6	16,5	84,7	48,0	34,3
150	152	29,8	2480	22,4	65,2	79,2	20,8	86,2	51,5	40,4
160	157	38,0	2534	24,6	69,6	81,8	26,5	88,1	56,6	46,9
170	163	48,2	2589	27,2	73,9	84,9	33,6	90,0	62,5	53,8
180	168	60,8	2648	29,9	78,3	87,5	42,4	92,1	68,7	61,7
190	173	73,5	2694	32,3	82,6	90,1	51,3	93,7	74,3	69,1
200	177	87,0	2736	34,9	87,0	92,2	60,7	95,1	80,2	75,7
210	182	105,5	2788	37,8	91,3	94,8	73,6	96,9	86,9	84,7
220	188	124,4	2834	40,9	95,7	97,9	86,8	98,5	94,0	92,3
230	192	143,3	2876	43,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
240	196	163,7	2915	46,2	104,3	102,1	114,2	101,4	106,2	107,6
250	201	189,4	2959	49,6	108,7	104,7	132,2	102,9	114,0	115,9

4.3 Použité přístroje

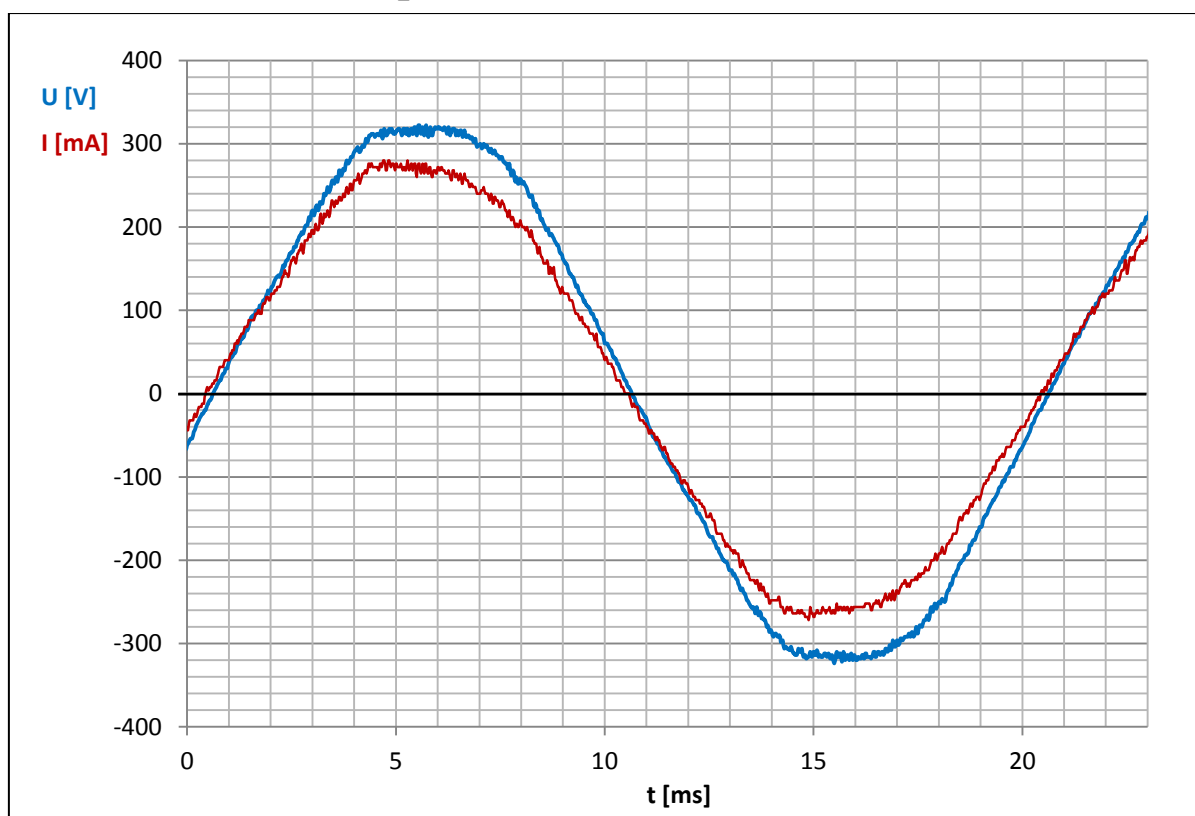
Typ	Výrobce	Označení	Výrobní číslo	Přesnost	Rozsah
Regulovatelný transformátor	Metra Blansko				0-230V; 10A
Multimetr	Unitest Hexagon	320	7333081	$\pm 0,6\% \pm 3 \text{ dig}$	
Indukční kleště	Chauvin Arnoux	C173	142697		0,001-1200A
Osciloskop	Tektronix	TPS2014			100-240VAC
Chroma metr	Konica Minolta	CL-200	76631127	$\pm 2\% \pm 1 \text{ dig}$	0,1-99900 lx

4.4 Křížová charakteristika

$$I_{ef} = f(U); E = f(U); P = f(U); M_z = f(U)$$



4.5 Průběh odebíraného proudu



4.6 Zhodnocení měření

Halogenová žárovka se chová jako klasická žárovka. Průběh světelného toku je exponenciální v závislosti na napájecím napětí. Teplota chromatičnosti lineárně roste s napětím a dosahuje vyšších hodnot než žárovka klasická.

Při snížení napájecího napětí o 30%, poklesne světelný tok na hodnotu 26,5%, teplota chromatičnosti na 88% a světelná účinnost na 47% nominální hodnoty. Naopak při zvýšení napájecího napětí o 10% se zvýší světelný tok o více než 33%, teplota chromatičnosti 3% a světelná účinnost o více než 16%.

S porovnáním s klasickou žárovkou dosahuje halogenová žárovka vyšší teploty chromatičnosti a světelné účinnosti. Změny provozních parametrů z důsledku změny velikosti napájecího napětí jsou ale u obou světelných zdrojů přibližně stejné, tak jako harmonický průběh odebíraného proudu.

5 KOMPAKTNÍ ZÁŘIVKA

Kompaktní zářivky dosahují vyšší účinnosti přeměny elektrické energie na světelnou, ale obsahují předřadník, který odebírá proud nesinusového průběhu. Pro porovnání s ostatními světelnými zdroji s předřadníky jsou vykresleny jednotlivé liché složky spektra odebíraného proudu. Testována byla kompaktní zářivka OSRAM o příkonu 14 W.

5.1 Parametry kompaktní zářivky

- Výrobce OSRAM
- Typ kompaktní zářivka
- Příkon 14 W
- Světelný tok 820 lm
- Měrný výkon 58,6 lm/W
- Teplota chromatičnosti 2500 K
- Index podání barev 80
- Nominální napětí 230 V
- Patice E27
- Doba náběhu 20 s
- Počet sepnutí 500 000
- Životnost 20 000 h
- Délka 131 mm
- Průměr 45 mm
- Počet sepnutí 500 000



Obrázek 34 Měřená kompaktní zářivka OSRAM 14 W

5.2 Tabulka naměřených hodnot

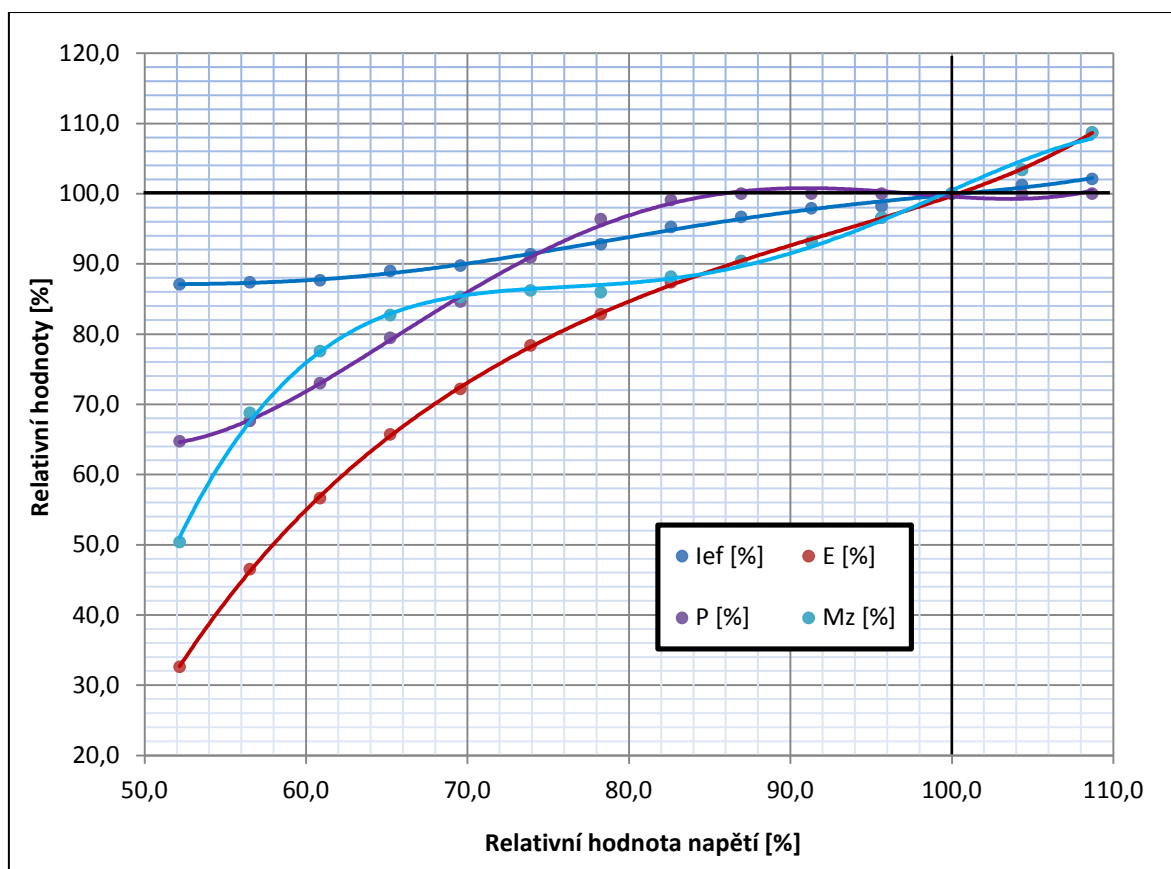
U_{ef} [V]	I_{ef} [mA]	E [lx]	T [K]	P [W]	U_{ef} [%]	I_{ef} [%]	E [%]	T [%]	P [%]	M_z [%]
120	91,7	79,0	2475	7,1	52,2	87,1	32,6	-	64,7	50,4
130	92,0	112,7	2499	7,4	56,5	87,4	46,5	-	67,6	68,8
140	92,3	137,2	2520	8,0	60,9	87,7	56,6	-	73,0	77,6
150	93,7	159,2	2546	8,7	65,2	89,0	65,7	-	79,5	82,7
160	94,5	174,9	2564	9,3	69,6	89,7	72,2	-	84,6	85,3
170	96,2	189,9	2591	10,0	73,9	91,4	78,4	-	90,9	86,2
180	97,7	200,7	2609	10,6	78,3	92,8	82,8	-	96,4	86,0
190	100,3	211,7	2632	10,9	82,6	95,3	87,4	97,2	99,1	88,2
200	101,8	219,0	2657	11,0	87,0	96,7	90,4	98,2	100,0	90,4
210	103,1	225,7	2676	11,0	91,3	97,9	93,1	98,9	100,0	93,1
220	103,4	234,0	2696	11,0	95,7	98,2	96,6	99,6	100,0	96,6
230	105,3	242,3	2707	11,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
240	106,6	250,5	2718	11,0	104,3	101,2	103,4	100,4	100,0	103,4
250	107,5	263,4	2711	11,0	108,7	102,1	108,7	100,1	100,0	108,7

5.3 Použité přístroje

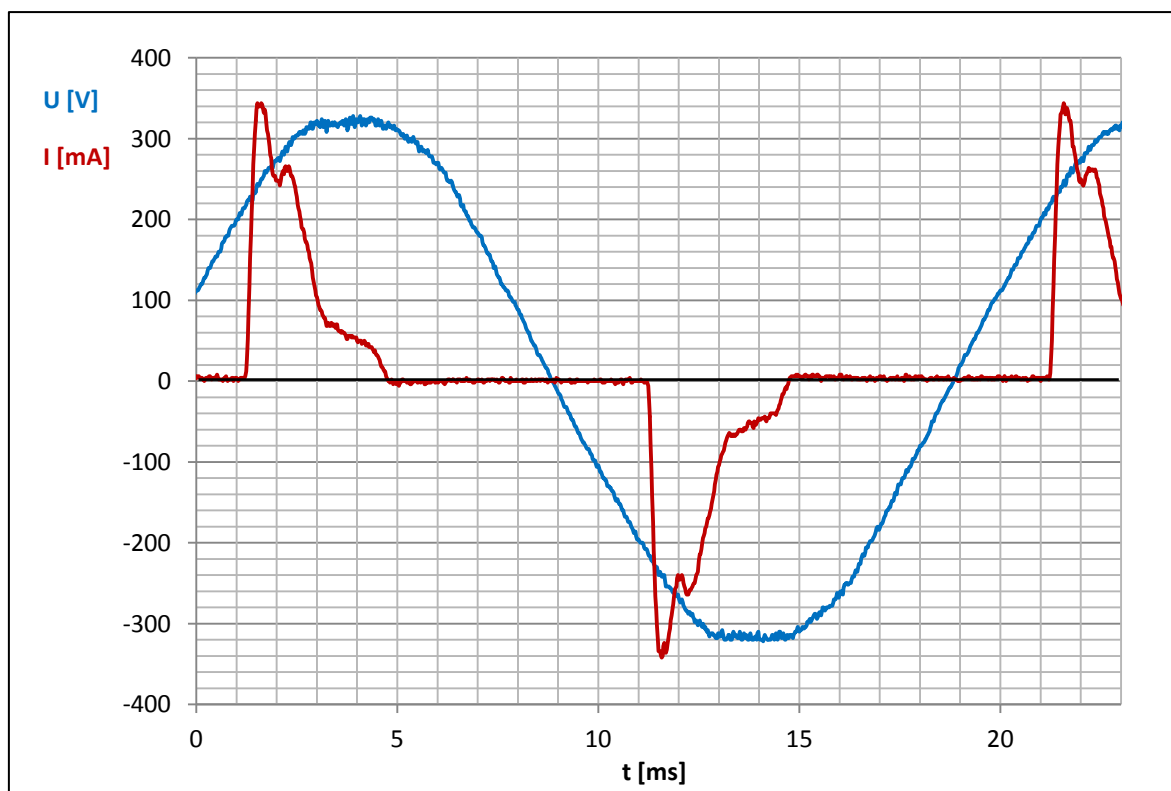
Typ	Výrobce	Označení	Výrobní číslo	Přesnost	Rozsah
Regulovatelný transformátor	Metra Blansko				0-230V; 10A
Multimetr	Agilent	U1241A	TW47360117	$\pm 0,5\%$ ± 3 dig	440mA
Multimetr	Agilent	U1251A	TW48179238	$\pm 0,2\%$ ± 5 dig	440mA
Indukční kleště	Chauvin Arnoux	C173	142697		0,001-1200A
Osciloskop	Tektronix	TPS2014			100-240VAC
Chroma metr	Konica Minolta	CL-200	76631127	$\pm 2\%$ ± 1 dig	0,1-99900 lx

5.4 Křížová charakteristika

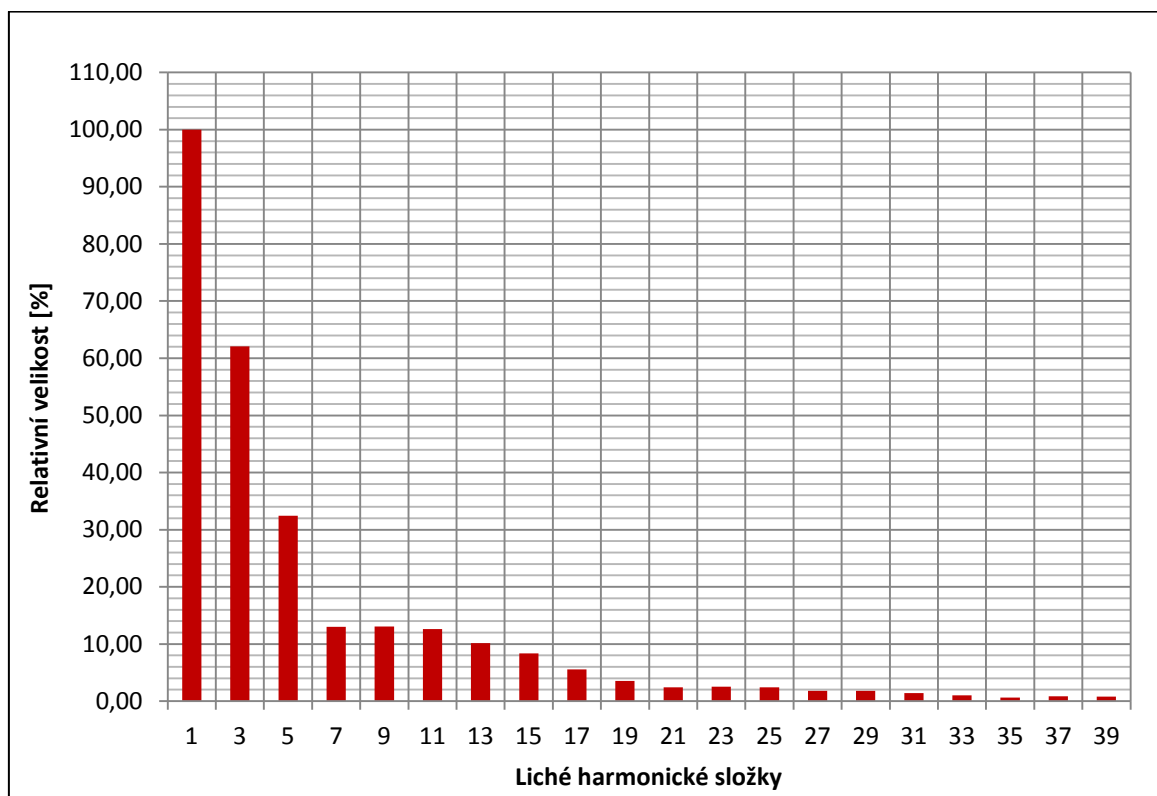
$$I_{ef} = f(U); E = f(U); P = f(U); M_z = f(U)$$



5.5 Průběh odebíraného proudu



5.6 Liché složky spektra odebíraného proudu



5.7 Zhodnocení měření

Kompaktní zářivka OSRAM 14 W obsahuje předřadník, který má za úkol nastartovat a udržet elektrický oblouk uvnitř trubice. Proto se kompaktní zářivka oproti klasické žárovce chová jako nelineární odpor. Pro udržení elektrického dynamického oblouku je nutné při snižování napětí udržovat dostatečně velký proud. Pokud ale napětí klesne pod minimální hodnotu napětí pro udržení elektrického oblouku, zářivka zhasne. Předřadník tedy kompenzuje nižší napětí zvyšováním činného napájecího proudu. Při hodnotě $U = 120 \text{ V}$ začíná zářivka poblikávat a při dalším snížení napětí elektrický oblouk zhasíná. $U = 120 \text{ V}$ je tedy minimální hodnota napětí pro udržení dynamického oblouku v trubici.

Z křížové charakteristiky je patrné, že předřadný prvek nejlépe funguje v rozmezí 70 - 100% nominálního napětí. Světelný tok a teplota chromatičnosti se v této oblasti mění jen mírně a lineárně. Pokud snížíme napájecí napětí pod 70% nominálního, začne světelný tok klesat exponenciálně až do hodnoty přibližně 52% hodnoty nominální, při které elektrický oblouk v trubici zcela zaniká.

Při poklesu napájecího napětí o 30%, poklesne velikost světelného toku o 28% a světelná účinnost o 15%. Naopak při zvýšení napětí o 10% vzroste světelný tok a účinnost přibližně o stejnou hodnotu. Teplota chromatičnosti s klesajícím napětím nepatrně lineárně klesá.

Odebíraný proud předřadníkem má velké množství harmonických složek. Z hlediska EMC nás nejvíce zajímají liché harmonické složky. Tento odebíraný proud svým průběhem pravděpodobně nesplňuje předepsanou normu ČSN EN 61000-3-2. Naměřené hodnoty spektra jsou pouze orientační.

6 INDUKČNÍ ZÁŘIVKA

Indukční zářivky nemají elektrody, které by se opotřebovaly. To zaručuje vysokou životnost i při častém spínání. Předřadníkem indukční zářivky generuje vysokofrekvenční magnetické budící pole, které aktivuje plyny uvnitř trubice pokryté luminoforem.

6.1 Parametry indukční zářivky

- Výrobce E.F. Lamp
- Typ indukční zářivka
- Příkon 20 W
- Světelný tok 1200 lm
- Měrný výkon 60 lm/W
- Teplota chromatičnosti 2700 K
- Index podání barev 80
- Nominální napětí 230-240 V
- Frekvence sítě 60 Hz
- Patice E27
- Životnost 60 000 h



Obrázek 35 Indukční zářivka L.F. Lamp 20 W

6.2 Tabulka naměřených hodnot

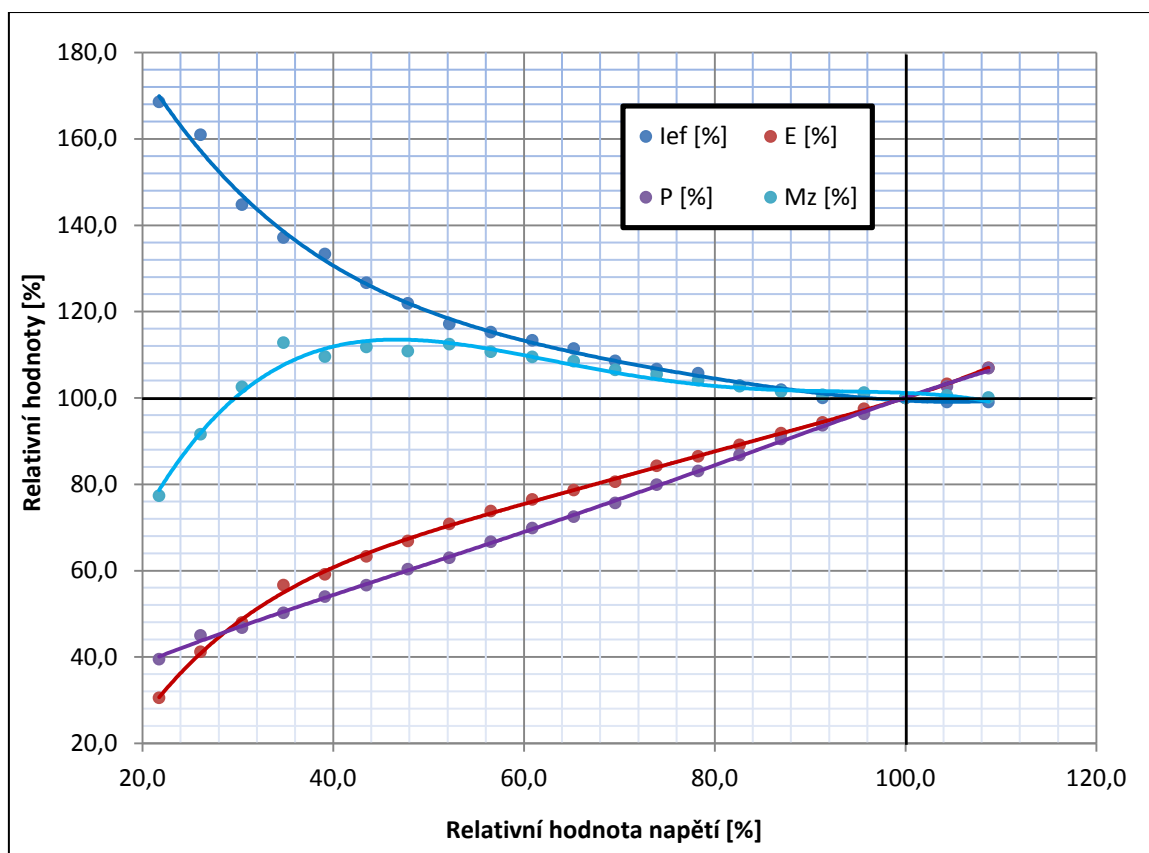
U_{ef} [V]	I_{ef} [mA]	E [lx]	T [K]	P [W]	U_{ef} [%]	I_{ef} [%]	E [%]	T [%]	P [%]	M_z [%]
50	177	96,8	2655	7,46	21,7	168,6	30,5	71,5	39,5	77,3
60	169	130,6	2692	8,50	26,1	161,0	41,2	72,5	45,0	91,6
70	152	152,1	2735	8,84	30,4	144,8	48,0	73,7	46,8	102,6
80	144	179,6	2787	9,49	34,8	137,1	56,6	75,1	50,2	112,8
90	140	187,5	2837	10,20	39,1	133,3	59,1	76,4	54,0	109,6
100	133	200,7	2900	10,70	43,5	126,7	63,3	78,1	56,6	111,8
110	128	212,0	2963	11,40	47,8	121,9	66,9	79,8	60,3	110,8
120	123	224,5	3034	11,90	52,2	117,1	70,8	81,7	63,0	112,4
130	121	234,0	3100	12,60	56,5	115,2	73,8	83,5	66,7	110,7
140	119	242,5	3164	13,20	60,9	113,3	76,5	85,2	69,8	109,5
150	117	249,4	3252	13,70	65,2	111,4	78,7	87,6	72,5	108,5
160	114	255,5	3336	14,30	69,6	108,6	80,6	89,8	75,7	106,5
170	112	267,2	3404	15,10	73,9	106,7	84,3	91,7	79,9	105,5
180	111	274,2	3471	15,70	78,3	105,7	86,5	93,5	83,1	104,1
190	108	282,6	3522	16,40	82,6	102,9	89,1	94,9	86,8	102,7
200	107	291,2	3590	17,10	87,0	101,9	91,8	96,7	90,5	101,5
210	105	299,1	3636	17,70	91,3	100,0	94,3	97,9	93,7	100,7
220	106	309,1	3679	18,20	95,7	101,0	97,5	99,1	96,3	101,2
230	105	317,1	3713	18,90	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
240	104	327,4	3742	19,40	104,3	99,0	103,2	100,8	102,6	100,6
250	104	339,2	3746	20,20	108,7	99,0	107,0	100,9	106,9	100,1

6.3 Použité přístroje

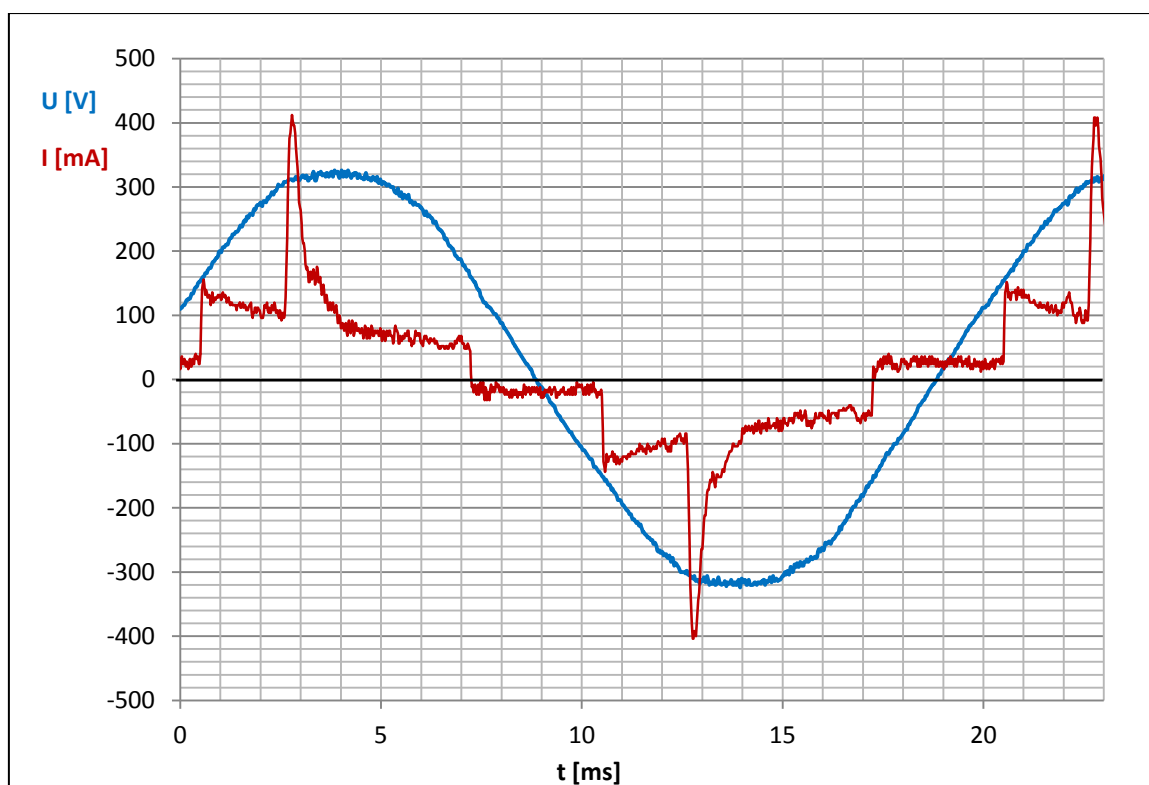
Typ	Výrobce	Označení	Výrobní číslo	Přesnost	Rozsah
Regulovatelný transformátor	Metra Blansko				0-230V; 10A
Multimetr	Agilent	U1251A	TW48179238	$\pm 0,2\% \pm 5 \text{ dig}$	440mA
Indukční kleště	Chauvin Arnoux	C173	142697		0,001-1200A
Osciloskop	Tektronix	TPS2014			100-240VAC
Chroma metr	Konica Minolta	CL-200	76631127	$\pm 2\% \pm 1 \text{ dig}$	0,1-99900 lx

6.4 Křížová charakteristika

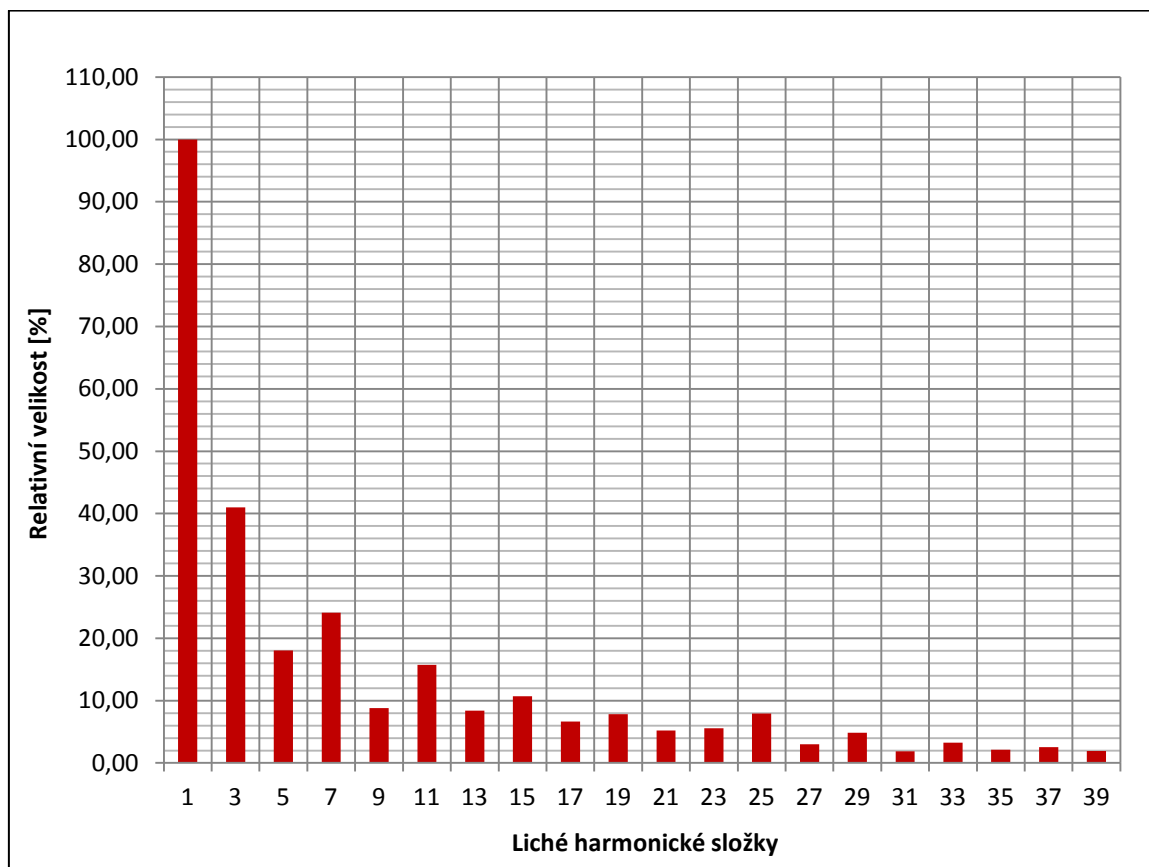
$$I_{ef} = f(U); E = f(U); P = f(U); M_z = f(U)$$



6.5 Průběh odebíraného proudu



6.6 Liché složky spektra odebíraného proudu



6.7 Zhodnocení měření

Indukční výbojky neobsahují žádné žhavicí elektrody. Žhavení se provádí díky pomoci vysokofrekvenčního magnetického pole. Předřadný obvod proto musí být schopen generovat vysokofrekvenční proudy. Při snižování napětí odebírání předřadník stále větší proud, aby udržel elektrický oblouk uvnitř trubice.

Z křížové charakteristiky je patrné, že závislost odebíraného proudu je exponenciálně klesající s rostoucí hodnotou napájecího napětí. Teplota chromatičnosti a velikost světelného toku lineárně klesá s napětím, přičemž pod 50% hodnoty nominálního napětí světelný tok klesá exponenciálně do doby, než elektrický oblouk zcela zaniká..

Při snížení napájecího napětí o 30% klesne světelný tok přibližně o 20%, teplota chromatičnosti o 10% a světelná účinnost se zvýší o 6,5%. Nejvyšší světelné účinnosti dosahuje světelný zdroj při napájecím napětí $U = 120 \text{ V}$. Tato hodnota činí 112% světelné účinnosti za nominálního napájecího napětí.

Odebíraný proud je vysokofrekvenčního charakteru. Liché harmonické složky opět převyšují normou stanovené limity a proto tento světelný zdroj pravděpodobně nesplňuje normu ČSN EN 61000-3-2. Hodnoty naměřených spekter jsou pouze orientační a nelze z nich vyvozovat přesné závěry.

7 LED

Elektroluminiscenční diody mají velice dobrou světelnou účinnost přeměny elektrické energie. LED jsou napájeny proudovými zdroji a pro zvýšení celkového světelného toku je nutné zvýšit počet jednotlivých čipů. Testována byla LED žárovka značky TESLUX o příkonu 9,5W.

7.1 Parametry LED žárovky

- Výrobce TESLUX
- Typ LED zářivka
- Počet čipů 72
- Celkový příkon 9,5 W
- Světelný tok 900 lm
- Měrný výkon 94,7 lm/W
- Teplota chromatičnosti 3000 K
- Index podání barev 80
- Nominální napětí 230V
- Frekvence sítě 50 Hz
- Patice E27
- Životnost 30 000 h



Obrázek 36 Měřená LED žárovka Teslux 9,5 W

7.2 Tabulka naměřených hodnot

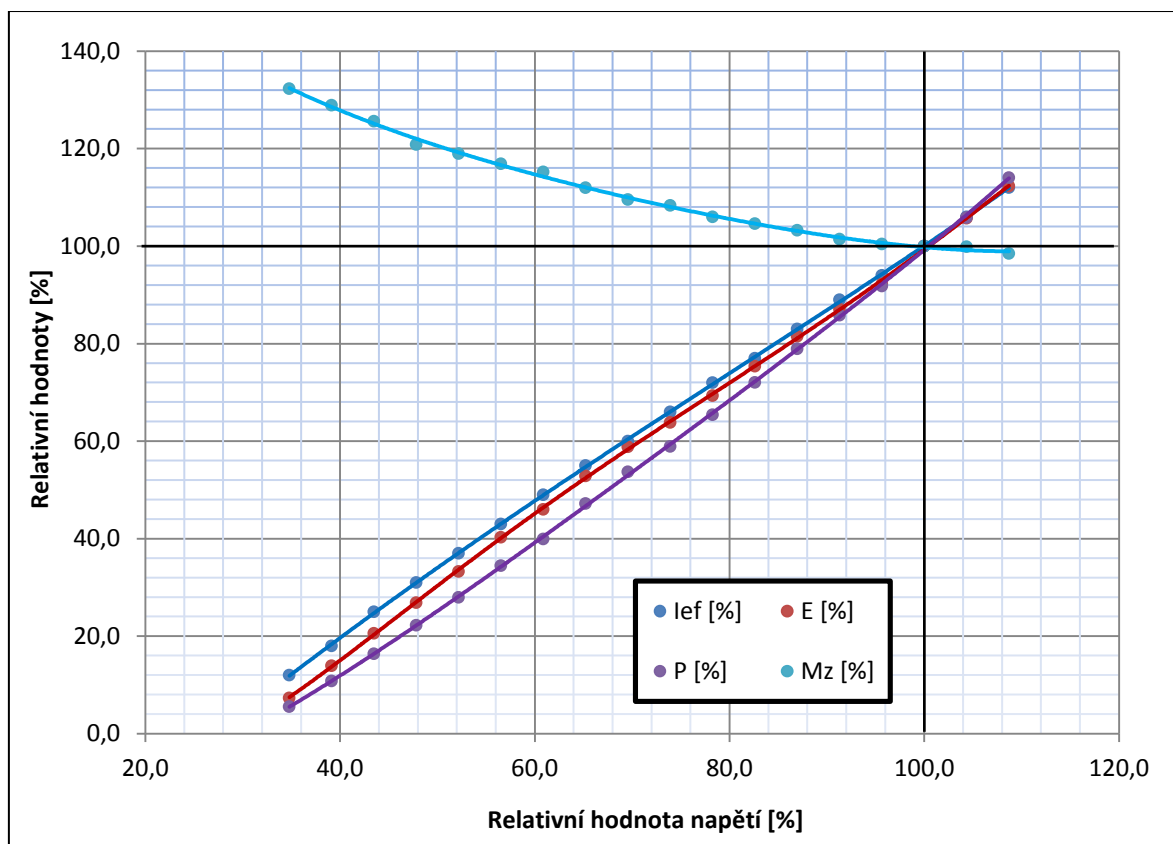
U_{ef} [V]	I_{ef} [mA]	E [lx]	T [K]	P [W]	U_{ef} [%]	I_{ef} [%]	E [%]	T [%]	P [%]	M_z [%]
80	12	14,1	3265	0,43	34,8	12,0	7,3	99,6	5,5	132,3
90	18	26,8	3261	0,83	39,1	18,0	13,9	99,5	10,8	128,9
100	25	39,6	3261	1,26	43,5	25,0	20,6	99,5	16,4	125,6
110	31	51,7	3265	1,71	47,8	31,0	26,9	99,6	22,2	120,8
120	37	64,0	3265	2,15	52,2	37,0	33,3	99,6	28,0	119,0
130	43	77,5	3269	2,65	56,5	43,0	40,3	99,8	34,5	116,9
140	49	88,5	3270	3,07	60,9	49,0	46,0	99,8	39,9	115,2
150	55	101,7	3274	3,63	65,2	55,0	52,9	99,9	47,2	112,0
160	60	113,2	3276	4,13	69,6	60,0	58,8	100,0	53,7	109,6
170	66	122,8	3280	4,53	73,9	66,0	63,8	100,1	58,9	108,3
180	72	133,4	3285	5,03	78,3	72,0	69,3	100,2	65,4	106,0
190	77	145,0	3285	5,54	82,6	77,0	75,4	100,2	72,0	104,6
200	83	156,8	3286	6,07	87,0	83,0	81,5	100,3	78,9	103,2
210	89	167,5	3287	6,60	91,3	89,0	87,1	100,3	85,8	101,4
220	94	177,4	3288	7,06	95,7	94,0	92,2	100,3	91,8	100,4
230	100	192,4	3277	7,69	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
240	106	203,4	3274	8,14	104,3	106,0	105,7	99,9	105,9	99,9
250	112	216,1	3267	8,77	108,7	112,0	112,3	99,7	114,0	98,5

7.3 Použité přístroje

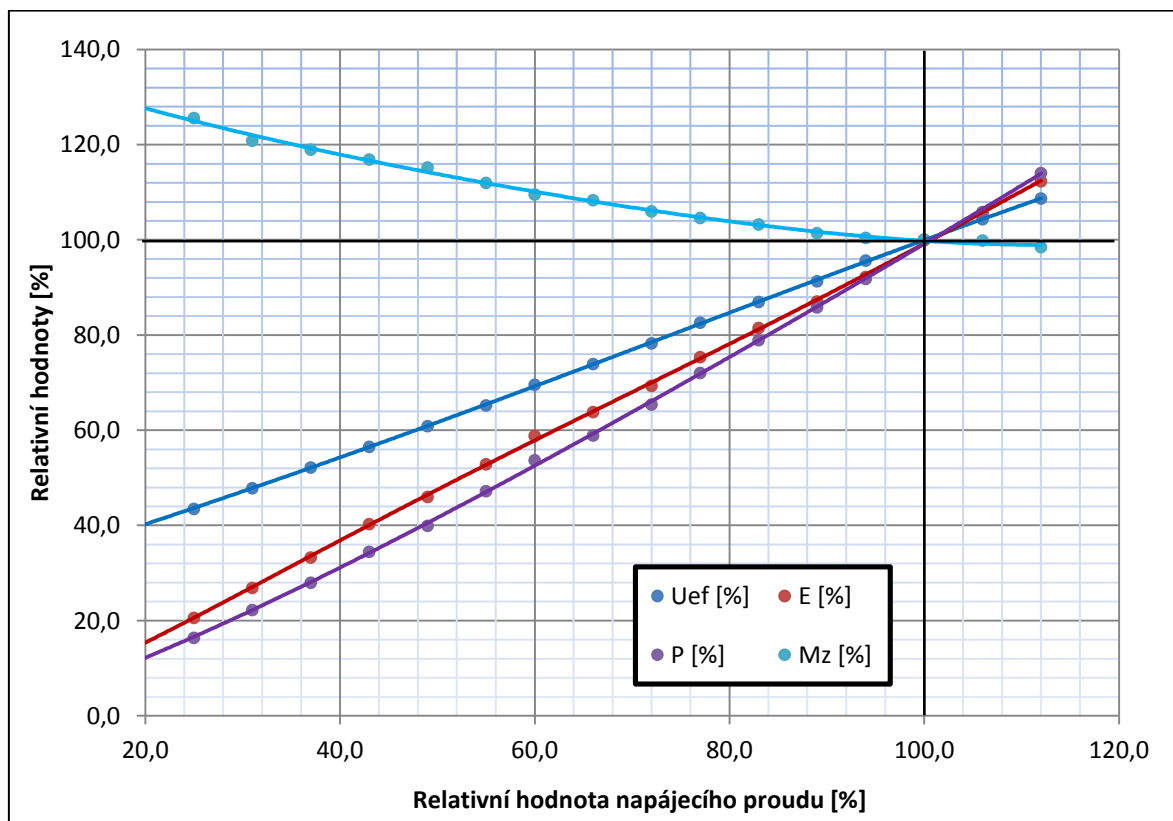
Typ	Výrobce	Označení	Výrobní číslo	Přesnost	Rozsah
Regulovatelný transformátor	Metra Blansko				0-230V; 10A
Multimetr	Agilent	U1251A	TW48179238	$\pm 0,2\% \pm 5 \text{ dig}$	440mA
Indukční kleště	Chauvin Arnoux	C173	142697		0,001-1200A
Osciloskop	Tektronix	TPS2014			100-240VAC
Chroma metr	Konica Minolta	CL-200	76631127	$\pm 2\% \pm 1 \text{ dig}$	0,1-99900 lx

7.4 Křížové charakteristiky

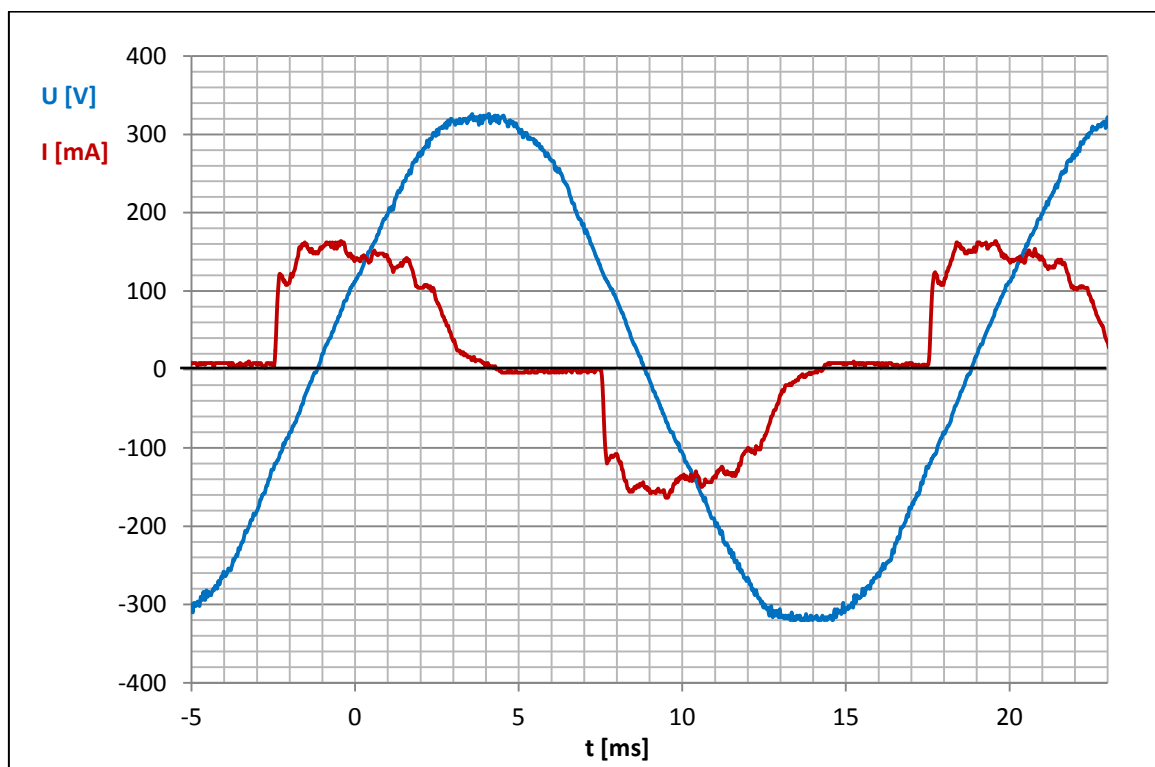
$$I_{ef} = f(U); T = f(U); E = f(U); P = f(U); M_z = f(U)$$



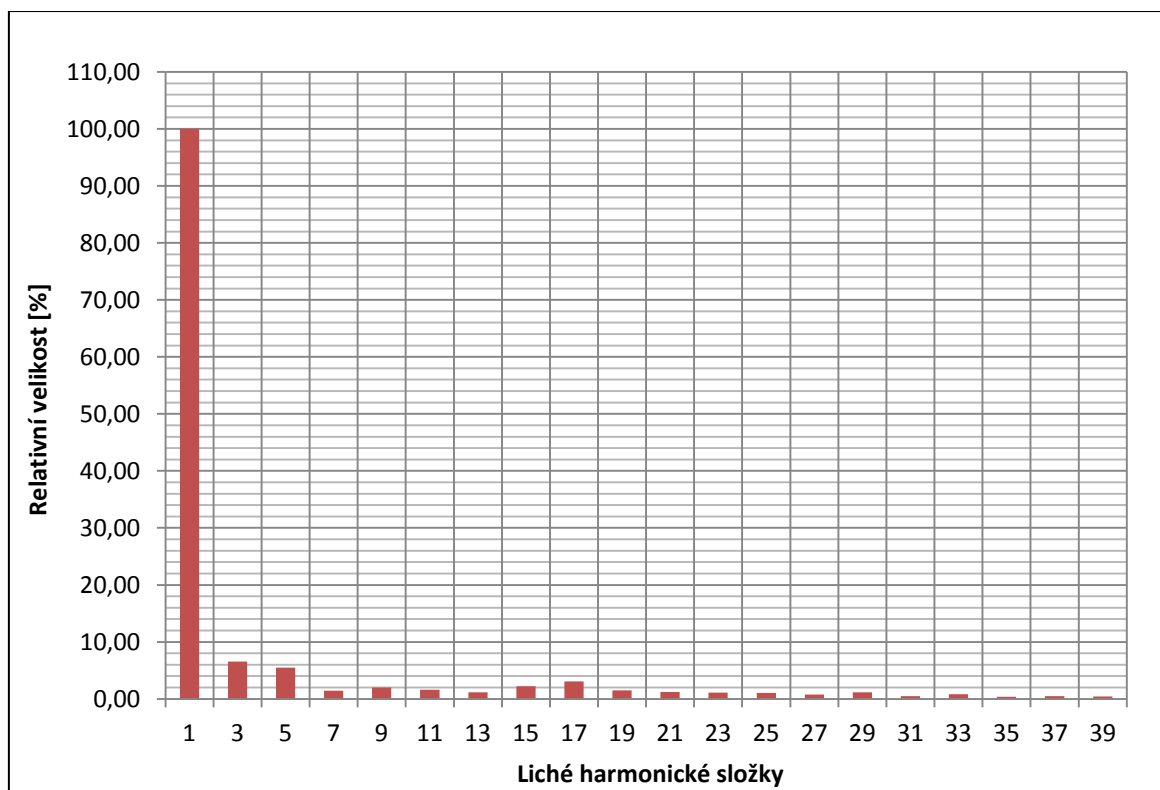
$$U = f(I_{ef}); T = f(I_{ef}); E = f(I_{ef}); P = f(I_{ef}); M_z = f(I_{ef})$$



7.5 Průběh odebíraného proudu



7.6 Liché složky spektra odebíraného proudu



7.7 Zhodnocení měření

Svítivé diody představují nelineární odpor. Při zvyšování napětí na diodě roste proud protékající diodou exponenciálně. U LED žárovky Teslux je závislost proudu na napětí lineární. Světelný tok roste také lineárně v závislosti na zvyšování proudu či napětí, přičemž u proudu je tato linearita strmější. Teplota chromatičnosti je nezávislá na změně velikosti napájecího napětí nebo proudu.

Účinnost přeměny světelné energie exponenciálně roste při snižování napájecího proudu nebo napětí. LED je tedy z hlediska světelné účinnosti výhodnější provozovat při nižších výkonech. Například pokud snížíme napájecí napětí přibližně na jednu třetinu nominálního, klesne proud na jednu desetinu a světelná účinnost vzroste o více než 33%.

Odebíraný proud předřadníkem LED žárovky Teslux je kapacitního charakteru. Průběh proudu je více podobný harmonickému průběhu, než u jiných testovaných světelných zdrojů. Liché složky spektra odebíraného proudu jsou také mnohem nižší než kompaktní zářivky OSRAM a indukční zářivky L.E. Lamp.