




## Metodika hodnocení plnospektrálních světelných zdrojů na základě posudku prof. Shelbyho Templa

**Objednatel:** Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola elektrotechnická Františka Křižíka  
se sídlem: Na Příkopě 16, 11000 Praha 1  
IČ: 70837881,  
DIČ: CZ70837881  
zastoupená: Ing. Milošem Kodadem, ředitelem

**Dodavatel:** Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, laboratoř světelné techniky  
se sídlem: Technická 3058/10, 616 00 Brno  
IČ: 00216 305  
DIČ: CZ00216305  
zastoupený: prof. RNDr. Vladimír Aubrecht, CSc., děkan FEKT VUT  
zodpovědní pracovníci: 

**Datum:** červen 2024

## Obsah

1. Předmět metodiky .....	3
2. Právní předpisy, technické normy a doporučení .....	3
3. Názvosloví, definice .....	3
4. Kvalifikace osob provádějící měření .....	5
5. měřicí zařízení .....	5
5.1 Hlavní měřicí zařízení .....	6
5.2 Pomocná měřicí zařízení a pomůcky .....	6
6. Obecné podmínky měření – veličiny ovlivňující výsledky měření .....	6
7. Metrologické meze využití metody měření .....	7
8. Příprava měření .....	7
Před zahájením vlastního měření je třeba provést přípravu zdrojů a svítidel, v rámci níž se shromáždí informace o měřeném zařízení a to zejména jeho napájení, pracovní poloze, rozsahu pracovních teplot .....	7
8.1 Shromáždění informací o měřeném svítidle / zdroji .....	7
8.2 Příprava svítidla nebo zdroje světla .....	7
8.3 Příprava měřicích přístrojů .....	8
9. Postup měření .....	8
9.1 Doplnkové měření .....	8
10. Nejistoty měření .....	9
11. Vyhodnocení měření .....	10
11.3 Formát vstupních dat .....	10
11.4 Kontrola vstupních dat .....	10
11.5 Kritéria profesora S. Templa .....	10
11.6 Vyhodnocení a porovnání výsledků .....	11
11.7 Další hodnotící kritéria .....	13
12. Protokol o měření .....	15
13. Závěr .....	17



## 1. PŘEDMĚT METODIKY

Předmětem metodiky je vytvoření postupu pro hodnocení plnospektrálních světelných zdrojů (obecně jakýchkoliv světelných zdrojů) na základě posudku a doporučení profesora Shelbyho Templa.

## 2. PRÁVNÍ PŘEDPISY, TECHNICKÉ NORMY A DOPORUČENÍ

S navrhovanou metodikou souvisejí následující právní předpisy, technické normy a mezinárodní doporučení:

Zákon č. 505/1990 Sb.	Zákon o metrologii
Vyhl. č. 345/2002 Sb.	Vyhláška Ministerstva průmyslu a obchodu, kterou se stanoví měřidla k povinnému ověřování a měřidla podléhající schválení typu
ČSN EN 12665	Světlo a osvětlení - Základní termíny a kritéria pro stanovení požadavků na osvětlení
ČSN IEC 50(845)	Mezinárodní elektrotechnický slovník. Kapitola 845: Osvětlení
ČSN 36 0011-1	Měření osvětlení prostorů - Část 1: Základní ustanovení
ČSN 36 0011-2	Měření osvětlení prostorů - Část 2: Měřená denního osvětlení
ČSN 36 0011-3	Měření osvětlení prostorů - Část 3: Měření umělého osvětlení vnitřních prostorů
ČSN 36 0011-4	Měření osvětlení prostorů - Část 4: Měření umělého osvětlení venkovních prostorů
ČSN EN 12 464-1	Osvětlení pracovních prostorů – Část 1: Vnitřní pracovní prostory
ČSN EN 17037	Denní osvětlení budov
ČSN EN 12 193	Světlo a osvětlení - Osvětlení sportovišť
ČSN EN 62717	LED moduly pro všeobecné osvětlování – Výkonnostní požadavky
ČSN EN 62722-2-1	Vlastnosti svítidel - Část 2-1: Zvláštní požadavky pro LED svítidla, 9/2016
TNI 01 0115	Mezinárodní metrologický slovník – Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM)
0111-OOP-C046-15	Opatření obecné povahy, kterým se stanovují metrologické a technické požadavky na stanovená měřidla, včetně zkoušek při schvalování typu a při ověřování stanovených měřidel, ČMI, 01/2016
CIE 233:2019	Calibration, Characterization and Use of Array Spectroradiometers
CIE S 025	CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light
ISO/CIE 11664-2:2022	CIE standard illuminants
JCGM 100:2008	Guide to the expression of uncertainty in measurement
IEC TR 61547-1	Technical report: Equipment for general lighting purposes - EMC immunity requirements, Part 1: Objective light flickermeter and voltage fluctuation immunity test method

## 3. NÁZVOSLOVÍ, DEFINICE

Názvosloví a definice jsou obsaženy v příslušných normách (ČSN EN 12665, ČSN IEC 50 (845)) a v publikacích o metrologické terminologii (TNI 01 0115). Pro účely tohoto dokumentu platí následující termíny a definice:

### 3.1 barevný podnět (*colour stimulus*)

viditelné záření, které vniká do oka a budí chromatický nebo achromatický barevný počitek [IEC 60050-845:1987/CIE 17.4:1987; 845-03-02]

### 3.2 chromatičnost (*chromaticity*)

vlastnost barevného podnětu definovaná jeho trichromatickými souřadnicemi nebo náhradní nebo doplňkovou vlnovou délkou a čistotou  
[IEC 60050-845:1987/CIE 17.4:1987; 845-03-34]

### 3.3 trichromatické souřadnice (*chromaticity coordinates*)

podíl každé ze tří trichromatických složek k jejich součtu

POZNÁMKA 1 Jelikož součet tří trichromatických souřadnic je roven hodnotě 1, je plně postačující uvádět dvě z nich pro definici dané chromatičnosti.

POZNÁMKA 2 Ve standardních kolorimetrických soustavách CIE jsou trichromatické souřadnice označeny symboly  $x$ ,  $y$ ,  $z$  a  $x_{10}$ ,  $y_{10}$ ,  $z_{10}$ .  
[IEC 60050-845:1987/CIE 17.4:1987; 845-03-33]

### 3.4 trichromatické složky (*tristimulus values*)

množství tří měrných barevných podnětů v dané trichromatické soustavě potřebné k vyrovnání s barevným vjemem uvažovaného podnětu

POZNÁMKA Ve standardních kolorimetrických soustavách CIE se trichromatické složky barevného podnětu označují  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  a  $X_{10}$ ,  $Y_{10}$ ,  $Z_{10}$ .  
[IEC 60050-845:1987/CIE 17.4:1987; 845-03-22]

### 3.5 teplota chromatičnosti (*colour temperature*)

$T_c$  (K)

teplota černého tělesa, jehož záření má stejnou chromatičnost jako daný barevný podnět  
[IEC 60050-845:1987/CIE 17.4:1987; 845-03-49]

### 3.6 náhradní teplota chromatičnosti (*correlated colour temperature*)

$T_{cp}$  (K)

teplota černého tělesa, jehož vnímaná barva se co nejvíce podobá vjemu barvy uvažovaného podnětu při stejné jasnosti a za stanovených podmínek pozorování

POZNÁMKA 1 Doporučená metoda výpočtu náhradní teploty chromatičnosti podnětu je, že se na diagramu chromatičnosti určí teplota, která odpovídá průsečíku čáry teplotních zářičů se smluvní izoterperou, na níž leží bod reprezentující uvažovaný podnět (viz publikace CIE č. 15).

POZNÁMKA 2 Převrácená náhradní teplota chromatičnosti se používá častěji než převrácená teplota chromatičnosti, kdykoliv jde o náhradní teplotu chromatičnosti.  
[IEC 60050-845:1987/CIE 17.4:1987; 845-03-50]

### 3.7 podání barev (*colour rendering*)

vliv druhu světla na vjem barvy předmětů vědomým nebo podvědomým srovnáváním s vjemem jejich barvy ve srovnávacím světle

POZNÁMKA Německý výraz „Farbwiedergabe“ se vztahuje také k reprodukci barev.  
[IEC 60050-845:1987/CIE 17.4:1987; 845-02-59]



### **3.8 všeobecný index podání barev CIE 1974 (CIE 1974 general colour rendering index)**

$R_a$  (-)

střední hodnota zvláštních indexů podání barev CIE 1974 pro stanovenou sadu osmi zkušebních barevných vzorků

### **3.9 radiometr (radiometer)**

přístroj k měření zářivých veličin

[IEC 60050-845:1987/CIE 17.4:1987; 845-05-06]

### **3.10 spektrometr (spectroradiometer)**

přístroj k měření zářivých veličin v užších intervalech vlnových délek v daném rozsahu spektra

[IEC 60050-845:1987/CIE 17.4:1987; 845-05-07]

### **3.11 kolorimetr (colorimeter)**

přístroj k měření kolorimetrických veličin

[IEC 60050-845:1987/CIE 17.4:1987; 845-05-18]

### **3.12 stárnutí (ageing)**

doba provozu světelného zdroje nezbytná pro dosažení počátečních hodnot fotometrických a elektrických veličin

### **3.13 doba stabilizace (stabilisation time)**

doba provozu světelného zdroje potřebná pro dosažení stabilních hodnot fotometrických veličin a elektrického příkonu při konstantních napájecích podmínkách

### **3.14 nejistota měření (measurement uncertainty)**

nezáporný parametr charakterizující rozptýlení hodnot veličiny přiřazených k měřené veličině na základě použité informace.

### **3.15 chyba měření (measurement error)**

naměřená hodnota veličiny minus referenční hodnota veličiny

## **4. KVALIFIKACE OSOB PROVÁDĚJÍCÍ MĚŘENÍ**

Osoba provádějící měření spektrálních vlastností osvětlení a světelných zdrojů pomocí spektrometru musí vhodným způsobem prokázat svoji odbornou způsobilost, například osvědčením o interním zaškolení, o absolvování odborného kurzu nebo certifikátem odborné způsobilosti vydané organizací s příslušnou akreditací. Za osoby s prokazatelnou kvalifikací se rovněž považují i univerzitní pracoviště s akreditací studijních programů v příslušném oboru, např. světelná technika, osvětlovací technika apod., popřípadě jiný znalecký ústav s dostatečnou kvalifikací pracovníků.

## **5. MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ**

Pro měření spektrálních vlastností světelných zdrojů se jako hlavní měřicí zařízení používá spektrometr s kulovým integrátorem. Užití kulového integrátoru se spektrometrem pro ověření spektrálních vlastností svítidel a světelných zdrojů se používá pro to, aby bylo zajištěno rovnoměrné rozložení spektra vyzářené energie ze všech směrů, a tím eliminován vliv směrových závislostí spektra vznikajících u optických částí zdrojů a svítidel. Přímé měření spektra



spektroradiometrem u světelného zdroje se nedoporučuje, a to z důvodu parazitního světla a nemožnosti zajistit výběr vhodné polohy spektroradiometru vůči svítidlu/zdroji. Měřidla je nutné používat s příslušenstvím dodaným nebo doporučeným výrobcem měřidla.

### 5.1 Hlavní měřicí zařízení

- Pro měření spektrálních vlastností zdrojů světla a svítidel se používají spektroradiometry s kulovým integrátorem.
- Pro popis vlastností spektroradiometrů se používá 11 charakteristik (viz. CIE 233: 2019).
- Důležitou charakteristikou spektroradiometru je linearita. Tato charakteristika souvisí s odchylkami v odečtu hodnot spektrálních parametrů v důsledku změn citlivosti spektroradiometru při různých úrovních ozáření.
- Dolní úroveň rozsahu vlnových délek spektroradiometru musí být menší nebo rovna hodnotě 380 nm.
- Horní úroveň rozsahu vlnových délek spektroradiometru musí být větší nebo rovna hodnotě 780 nm.
- 
- Krok měření musí být 1 nm. Spektrální pološířka (full-width at half maximum) spektroradiometru musí být rovna nebo menší než  $FWHM \leq 5$  nm.
- Spektroradiometry jako stanovená měřidla mají dobu platnosti ověření 1 rok (Vyhláška č.345/2002 Sb.). Maximální doba platnosti kalibrace nebo ověření v případech, kdy se nevyžaduje použití stanovených měřidel, není stanovena.
- Stanovená měřidla musí mít zkoušku typu v souladu s opatřením obecné povahy 0111-OOP-C046-15 (ČMI).

### 5.2 Pomocná měřicí zařízení a pomůcky

- Voltmetry se používají pro měření napájecího napětí světelného obvodu.
- Teploměry se používají pro měření teploty okolí.
- Měřidlo času (stopky, hodinky) se používají pro měření doby stabilizace osvětlení.

## 6. OBECNÉ PODMÍNKY MĚŘENÍ – VELIČINY OVLIVŇUJÍCÍ VÝSLEDKY MĚŘENÍ

- Spektrální vlastnosti světelných zdrojů a svítidel jsou dány použitou technologií světelných zdrojů, která určuje vyzařovací spektrum energie, resp. spektrální hustotu výkonu. Podle profesora Shelbyho Templa je důležité uvažovat záření světelného zdroje nejen z pohledu vizuálního, tedy jako fotometrický obsah, ale i z pohledu energetického, a to v různých spektrálních oblastech. Nelze tedy již obecně používat pojem světlo, který spojujeme s viditelnou částí optického záření, ale je třeba uvažovat záření jako celek a měřit energetický obsah v daném spektrálním rozsahu. Spektrální průběh záření může ovlivňovat řada vnějších faktorů jako je teplota, napájecí napětí, poloha světelného zdroje. Z tohoto důvodu je třeba podmínky při měření zaznamenat a případně zohlednit při vyhodnocování naměřených hodnot a nejistot měření.
- Spektrální vlastnosti také ovlivňuje technický stav světelných zdrojů, tedy zejména stáří, a to jakým způsobem byly provozovány – za jakých teplotních a napájecích podmínek. U nových světelných zdrojů dochází na začátku jejich provozu k významným změnám fotometrických, spektrálních a elektrických veličin. Z tohoto důvodu je třeba nechat světelné zdroje po předepsanou dobu v provozu (tzv. stárnutí). Po této době dosáhnou fotometrické, spektrální a elektrické veličiny svých nominálních hodnot, které zpravidla uvádí výrobce.
- Po zapnutí světelných zdrojů na napájecí zdroj trvá určitou dobu než se fotometrické, spektrální a elektrické parametry ustálí. Z tohoto důvodu je třeba nechat svítidlo / světelný zdroj před začátkem měření po předepsanou dobu zapnutou (doba stabilizace). Po této době



dosáhnou světelné zdroje při konstantních napájecích podmínkách stabilních hodnot fotometrických veličin a elektrického příkonu. Doba ustálení není jednoznačná pro všechny typy zdrojů a ustálení je třeba hlídat měřením kontrolovaného parametru – např. světelného nebo zářivého toku.

- V průběhu provozu dochází ke stárnutí osvětlovací soustavy a ke změnám spektrálních vlastností osvětlení. Před měřením je vhodné získat informace o stavu údržby a stáří osvětlovací soustavy.
- Spektrální vlastnosti některých typů světelných zdrojů jsou závislé na teplotě okolí. Z tohoto důvodu je třeba teplotu prostředí zaznamenat, a pokud je vliv teploty významný je třeba provést korekci naměřených hodnot na teplotu.
- Spektrální vlastnosti světelných zdrojů mohou být ovlivněny napájecím napětím. Z tohoto důvodu je nezbytné napájet svítidlo ze stabilizovaného napěťového zdroje.

## 7. METROLOGICKÉ MEZE VYUŽITÍ METODY MĚŘENÍ

Metodika měření spektrálních vlastností plnospektrálních zdrojů světla slouží pro laboratorní měření, není určena pro terénní měření.

Pro provozní měření spektrálních vlastností plnospektrálních zdrojů světla je možné metodiku využít jen orientačně a nedoporučuje se spoléhat na naměřené údaje spektrálního složení světla a následně vyhodnocené parametry z důvodu možných směrových chyb, nevhodného nastavení konfigurace světelný zdroj – spektrometr. Odhad rozšířené nejistoty u provozního měření jednotlivých parametrů vyjadřující spektrální vlastnosti osvětlení zde uveden není a bylo by nutné jej vyjádřit individuálně.

## 8. PŘÍPRAVA MĚŘENÍ

Před zahájením vlastního měření je třeba provést přípravu zdrojů a svítidel, v rámci níž se shromáždí informace o měřeném zařízení a to zejména jeho napájení, pracovní poloze, rozsahu pracovních teplot.

### 8.1 Shromáždění informací o měřeném svítidle / zdroji

- název, typ, popř. druh světelného zdroje / svítidla;
- výrobce světelného zdroje;
- jmenovité napájecí napětí, napájecí frekvence;
- krytí svítidla;
- rozměry (délka, šířka, výška);
- informace o ovládání a řízení svítidla nebo zdroje světla (regulace, provozní režimy);
- informace o stáří a údržbě svítidla nebo zdroje (harmonogram údržby);

### 8.2 Příprava svítidla nebo zdroje světla

- Svítidlo nebo světelný zdroj se umístí do středu kulového integrátoru.
- Kulový integrátor by měl mít průměr alespoň dvojnásobný, než je největší rozměr svítidla nebo světelného zdroje.
- Před měřením je třeba nechat světelné zdroje v provozu po stanovenou dobu (doba stárnutí). Doba stárnutí u žárovek a halogenových žárovek je 1 hodina, u výbojových zdrojů 100 hodin a u LED modulů pro všeobecné osvětlování 0 hodin (ČSN EN 62717), pokud výrobce neuvede jinak.
- Před vlastním měřením je třeba u světelných zdrojů, které již dosáhly doby stárnutí, zajistit stabilizaci jejich fotometrických a spektrálních veličin a elektrického příkonu. Přitom je třeba

zajistit konstantní napájecí podmínky. Za stabilizované se veličiny popisující spektrální vlastnosti osvětlení považují tehdy, pokud měřená hodnota daného parametru při měřeních s odstupem několika minut třikrát po sobě nevykazuje výrazné změny. U výbojkových svítidel a svítidel s jinými typy zdrojů s luminoforem (LED) se považuje za minimální dobu stabilizace světelného toku 20 minut. U uzavřených svítidel může být tato doba delší.

- V případě, že je svítidlo nebo zdroj ovládán a řízena řídicím systémem osvětlení, provede se kontrola a nastavení řídicího systému na požadovanou úroveň.
- Pro napájení svítidla nebo světelného zdroje je vhodné použít stabilizované zdroje s regulací výstupního napětí.

### 8.3 Příprava měřicích přístrojů

- Před vlastním měřením se spektrometry vystaví ozáření, které řádově odpovídá měřené úrovni ozáření. To je možné spojit s přípravou svítidla ve fázi kontroly ustálení parametrů zdroje anebo svítidla.
- Před měřením je nutné spektrometry teplotně stabilizovat, a to z důvodu jejich teplotní závislosti. Pokud by měření probíhalo mimo teplotu definovanou výrobcem, je nutné u naměřených hodnot provést korekci na teplotu.
- Kulový integrátor se spektrometrem musí mít platnou kalibraci a musí být splněny podmínky měření, které jsou uvedeny v kalibračním protokolu.

## 9. POSTUP MĚŘENÍ

### 9.1 Doplnkové měření

#### Měření teploty

Měření teploty okolního prostředí se doporučuje provést na začátku a konci měření. Teplota okolí může ovlivňovat nejen velikost světelného toku vyzařovaného svítidla, ale také přesnost měření spektrometru.

#### Měření napětí

Napětí se měří na svorkách měřeného světelné obvodu osobou s odpovídající kvalifikací (zákon č. 250/2021 Sb.) Při měření svítidel s elektronickými předřadníky je toto měření pouze orientační a korekce na napětí zpravidla není třeba neprovádět.

### 9.2.2 Hlavní měření

- Měření spektrálních vlastností se provádí ve výstupním otvoru kulového integrátoru. Spektrometr se umísťuje do otvoru tak, aby zachytil úměrnou část záření, která se v integrátoru smísí ze všech možných směrů vyzařování svítidla nebo zdroje světla.
- Eliminace parazitních zdrojů světla je zajištěna uzavřením zdroje nebo svítidla do kulového integrátoru.
- V případě, že je svítidlo nebo zdroj vybaveno řídicím systémem pro regulaci výstupního světelného toku, nastaví se výstupní světelný tok, pokud je to možné, na maximální hodnotu.
- Pokud soustava pracuje v různých provozních režimech (např. normální a adaptivní osvětlení) provádí se měření spektrálních vlastností v domluvených provozních režimech.
- Na začátku měření bude provedena korekce svítidla na absorpci záření neaktivními částmi svítidla pomocí korekční žárovky a spektrometru. Korekce pomocí fotočlánku není možná, protože svítidla nemusí mít použité materiály odrazně spektrálně neselektivní.
- Samotné měření probíhá po dobu, než se ustálí sledované světelně-technické parametry. Následně se hodnoty spektrální hustoty zářivého toku uloží v patřičném formátu.
- Zaznamenají se podmínky měření.



## 10. NEJISTOTY MĚŘENÍ

Kulový integrátor se spektrometrem je přístroj pro měření světelného toku a spektrální hustoty zářivého toku světelných zdrojů či svítidel. Rozšířená nejistota měření světelného toku se skládá z velkého počtu standardních nejistot. Standardní nejistoty lze rozdělit do těchto skupin.

- Nejistoty měřicího systému
  - Nejistota spektrometru
    - vlnová délka
    - linearita
    - opakovatelnost měření
    - rozptýlené parazitní záření
    - spektrální rozlišení
  - Nejistota světelného normálu
    - nejistota kalibrace
    - okolní podmínky (teplota)
    - stárnutí světelného normálu
    - opakovatelnost kalibrace
- Nejistota napájecích zdrojů
  - Nejistota stabilizovaného proudového zdroje pro světelný normál
  - Nejistota napájecího zdroje testovaného světelného zdroje
- Nejistoty konstrukčního charakteru
  - Nestejnoměrný povrch uvnitř koule
  - Absorpce neaktivních částí svítidel a přívodů

V následující tabulce je uveden příklad nejistot měření pro kulový integrátor se spektrometrem. Výpočty jednotlivých nejistot musí být v souladu s mezinárodně uznávaným návodem na výpočet nejistot GUM (Guide to the expression of uncertainty in measurement). Nejistoty jsou rozděleny pro svítidlo s uniformní a neuniformní vyzařující charakteristikou.

Tabulka 1 Nejistoty měření kulového integrátoru se spektrometrem

Název nejistoty	Symbol	Hodnota nejistoty	
		Uniformní	Neuniformní
Opakovatelnost měření	$u_a$	0,2	
Světelný normál	$u_{bn}$	1,9	
Stárnutí světelného normálu	$u_{bt}$	0,3	
Proudový zdroj pro světelný normál	$u_{bp}$	0,1	
Zdroj napětí pro testovaný světelný zdroj	$u_{bv}$	0,1	
Okolní teplota při měření	$u_{bt}$	0,4	
Rozptýlené světlo uvnitř spektrometru	$u_{bst}$	0,4	
Korekce světelně neaktivních částí svítidla	$u_{bc}$	0,8	
Opakovatelnost kalibrace	$u_{bk}$	0,4	
Nelinearita spektrometru	$u_{bnl}$	0,3	
Neuniformita povrchu uvnitř koule	$u_{bu}$	1,0	2,3
Opakovatelnost měření při otevírání KI	$u_{bo}$	0,3	
Vlnové délky	$u_{b\lambda}$	0,2	
Kombinovaná nejistota	$u_c$	2,4	2,7
Rozšířená nejistota	$u$	4,9	5,4

Kulový integrátor pro měření spektrální hustoty zářivého toku má nejistotu závislou na vlnové délce. Rozšířená nejistota měření spektrální hustoty zářivého toku je vyšší zpravidla v oblasti od 380 do 430 nm, kde je citlivost snímače spektrometru nižší a signál ze světelného normálu a korekční žárovky je také nižší než v oblasti NIR. Tato zvýšená nejistota v oblasti od 380 do 430 nm může mít podstatný vliv na hodnocení spektrálního průběhu podle posudku S. Templa, protože naměřené spektrum v této oblasti může být výrazně zatíženo chybou a vést ke špatnému vyhodnocení. Tato metodika doporučuje, aby nejistota měření spektrální hustoty zářivého toku nepřesáhla 10 % pro jakoukoliv vlnovou délku v rozsahu od 380 do 780 nm. Pro nejpřesnější porovnání by měly být porovnávány světelné zdroje nebo svítidla měřeny ve stejné laboratoři a ve stejném kulovém integrátoru. Tímto způsobem je zajištěno, že pokud je určitá část spektra zatížena chybou měření, tak jsou touto chybou ovlivněna spektra všech porovnávaných světelných zdrojů a výsledné hodnocení a porovnání spekter bude co nejpřesnější.

## 11. VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

### 11.3 Formát vstupních dat

Pro vyhodnocení měření musí být spektrální hodnoty uloženy s krokem 1 nm od 380 do 780 nm. V případě, kdy spektrometr ukládá data pro jiné vlnové délky, je nezbytné data lineárně interpolovat. Nejčastěji jsou hodnoty uloženy v souboru csv, txt, xls nebo xlsx. Hodnoty by měly být uloženy minimálně na 4 platné číslice.

### 11.4 Kontrola vstupních dat

Při vyobrazení naměřených dat by data neměla obsahovat značný posun (offset), který signalizuje teplotní neustálení spektrometru anebo špatně provedenou kalibraci na tmou (dark current), kterou spektrometr provádí nejčastěji autonomně při spuštění přístroje nebo nejlépe před každým měřením. Dále by spektrální průběh neměl obsahovat spektrální vrcholy, které neodpovídají předpokladům měřeného světelného zdroje a jejich zdroje by mohly být jiné, než je měřící světelný zdroj. Při měření v kulovém integrátoru je docíleno, že okolní zářivé zdroje neovlivňují naměřená data uvnitř kulového integrátoru.

### 11.5 Kritéria profesora S. Templa

Tato metodika je založena na základě doporučení profesora Shelbyho Templa (dále jen profesor), který v dokumentu „Health considerations of artificial lighting“ popisuje zásady optimálního spektrálního složení vnitřních umělých osvětlovacích soustav. Profesor doporučuje rozdělení pásma viditelného záření - na 4 intervaly, kde každý interval se hodnotí zvlášť.

#### a. Interval 380 – 455 nm – nebezpečí modro-fialového světla

V tomto rozsahu vlnových délek je doporučeno minimalizovat podíl spektrální hustoty zářivého toku za cílem minimalizovat akumulující fotochemické poškození sítnice. Za účelem porovnání různých spektrálních průběhů se vypočítá ukazatel  $f_A$  v tomto rozsahu následujícím vztahem:

$$f_A = \left( \frac{\sum_{i=380}^{455} \left( \frac{\Delta\Phi_{ez}(\lambda_i)}{\Delta\lambda_i} \right) \Delta\lambda_i}{\sum_{i=380}^{780} \left( \frac{\Delta\Phi_{ez}(\lambda_i)}{\Delta\lambda_i} \right) \Delta\lambda_i} - \frac{\sum_{i=380}^{455} \left( \frac{\Delta\Phi_{eD50}(\lambda_i)}{\Delta\lambda_i} \right) \Delta\lambda_i}{\sum_{i=380}^{780} \left( \frac{\Delta\Phi_{eD50}(\lambda_i)}{\Delta\lambda_i} \right) \Delta\lambda_i} \right) \cdot 100 \% \quad (1)$$

Kde výraz  $\frac{\Delta\Phi_{ez}(\lambda_i)}{\Delta\lambda_i}$  se označuje jako spektrální hustota zářivého toku testovaného světelného zdroje a má jednotku  $W \cdot nm^{-1}$ .  $\frac{\Delta\Phi_{eD50}(\lambda_i)}{\Delta\lambda_i}$  je adekvátně spektrální hustota zářivého toku standardního denního světla D50. Záporných hodnot ukazatele  $f_A$  dosahují spektrální složení,



kteří mají poměrně méně zářivého výkonu v oblasti od 380 do 455 nm než v porovnání se světlem D50.

### b. Interval 455 – 525 nm – zachování tyrkysově-modrého světla

Lidské oko obsahuje buňky (ipRGC), které jsou citlivé na tyto vlnové délky a pozitivně stimulují cirkadiánní rytmy a bdělost organismu. Podle doporučení profesora S. Temple je nezbytné, aby spektrum světelného zdroje obsahovalo dostatečné množství zářivého toku v tomto rozsahu. Pro kvantifikování melanopsinové odezvy (melanopsin response) zavedla mezinárodní společnost pro osvětlování CIE parametr ELR (efficacy of luminous radiation). Hodnotící ukazatel  $f_B$  je definován jako rozdíl parametrů ELR testovaného zdroje a světla D50.

$$f_B = K_{mel,V}^z - K_{mel,V}^{D50} = \frac{\sum_{i=380}^{780} \left( \frac{\Delta\Phi_e(\lambda_i)}{\Delta\lambda_i} \right) s_{mel}(\lambda) \Delta\lambda_i}{K_M \sum_{i=380}^{780} \left( \frac{\Delta\Phi_e(\lambda_i)}{\Delta\lambda_i} \right) V(\lambda) \Delta\lambda_i} - 1,12 \quad (mW \cdot lm^{-1}) \quad (2)$$

Kde  $K_M$  představuje maximální světelnou účinnost  $683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ . Tabulkované hodnoty  $V(\lambda)$  a  $s_{mel}(\lambda)$  se nachází v dokumentu CIE S 026 s krokem 1 nm.

### c. Interval 650 – 780 nm – zachování červené/NIR světla

Tyto vlnové délky mají příznivý účinek na regenerativní procesy mitochondrií v buňkách sítnice a pomáhají oddálit degenerativním procesům uvnitř oka. Vlnové délky v tomto rozsahu zvyšují aktivitu mitochondrií a tvorbu antioxidantů. Kvantifikovat podíl hustoty zářivého toku v oblasti těchto vlnových délek lze ukazatelem  $f_C$  a následujícím vztahem.

$$f_C = \left( \frac{\sum_{i=650}^{780} \left( \frac{\Delta\Phi_{ez}(\lambda_i)}{\Delta\lambda_i} \right) \Delta\lambda_i}{\sum_{i=380}^{780} \left( \frac{\Delta\Phi_{ez}(\lambda_i)}{\Delta\lambda_i} \right) \Delta\lambda_i} - \frac{\sum_{i=650}^{780} \left( \frac{\Delta\Phi_{eD50}(\lambda_i)}{\Delta\lambda_i} \right) \Delta\lambda_i}{\sum_{i=380}^{780} \left( \frac{\Delta\Phi_{ez}(\lambda_i)}{\Delta\lambda_i} \right) \Delta\lambda_i} \right) \cdot 100 \% \quad (\%) \quad (3)$$

Kulový integrátor se spektrometrem musí mít měřící rozsah vlnových délek od 380 nm do 780 nm.

### d. Interval 455 – 800 nm – přirozené světlo

V tomto rozsahu navrhuje profesor S. Temple, aby spektrální rozložení bylo co nejvíce podobné dennímu světlu D50, které definuje mezinárodní společnost pro osvětlování CIE (ISO/CIE 11664-2:2022). Pro hodnocení lze definovat ukazatel  $f_D$ , který lze vyjádřit následujícím vztahem

$$f_D = \frac{\sum_{i=455}^{800} |s_{zi} - s_{D50i}| \Delta\lambda_i}{\sum_{i=455}^{800} s_{D50i} \Delta\lambda_i} \cdot 100 \% \quad (\%) \quad (4)$$

kde představují  $s_z$  a  $s_{D50}$  spektrální průběhy testovaného světelného zdroje a standardního denního světla D50 nanormované na hodnotu 1000 lm. Normalizace spektrální hustoty zářivého toku na hodnotu světelného toku  $\Phi$  lze provést následujícím vztahem.

$$s(\lambda) = \frac{\Delta\Phi_e(\lambda)}{\Delta\lambda} \cdot \frac{\Phi}{683 \sum_{i=380}^{780} \left( \frac{\Delta\Phi_e(\lambda_i)}{\Delta\lambda_i} \right) V(\lambda) \Delta\lambda_i} \quad (W \cdot nm^{-1}) \quad (5)$$

## 11.6 Vyhodnocení a porovnání výsledků

Cílem této metodiky je porovnat spektrální rozložení jednotlivých světelných zdrojů z hlediska jednotlivých kritérií A - D z předešlé kapitoly. Nicméně jednotlivé hodnotící ukazatele mají rozdílné

jednotky, tak nelze jednoznačně hodnotit spektrální průběh pouze jednou hodnotou. Na úrovni jednotlivých kritérií lze jednotlivé spektrální průběhy srovnávat, ale pokud je zapotřebí ohodnotit spektrální průběh pouze jednou hodnotou, tak je nezbytné jednotlivé hodnotící ukazatele převést na stejnou hodnotící stupnici. Za tímto účelem lze využít stupnice 1 (nejlepší) až 5 (nejhorší). Pro tyto limitní hodnoty je ale zapotřebí přiřadit odpovídající limity jednotlivých hodnotících ukazatelů. Každé kritérium je tedy ve výsledku hodnoceno stejnou stupnicí a lze pro spektrální průběh stanovit průměrné hodnocení jako aritmetický průběh. Hodnotící stupnici lze definovat pro jednotlivá kritéria následovně.

$$\begin{aligned}
 y_{\alpha} &= y_{min} & x < x_{min} \\
 y_{\alpha} &= y_{max} & x > x_{max} \\
 y_{\alpha} &= y_0 + \frac{y_{max} - y_{min}}{x_{max} - x_{min}} \cdot (x - x_{min}) & x_{min} \leq x \leq x_{max}
 \end{aligned} \tag{6}$$

Rozsahy stupnice lze volit volitelně. Nicméně v této metodice je doporučeno využívat stupnice 1-5 a tedy ve vztazích je dosazeno za  $y_{min} = 1$  a  $y_{max} = 5$ . Pro určení  $x_{min}$  a  $x_{max}$  byly zvoleny hodnoty na základě změřených referenční spektrálních průběhů, kdy hodnoty odpovídající zcela nevhodnému spektru byly přiřazeny k hodnotám  $x_{max}$  a obdobně nejlepším hodnotám  $x_{min}$ . Následující tabulka 1 obsahuje doporučené hodnoty pro definici hodnotící stupnice.

Tabulka 2 Doporučené rozsahy a limitní hodnoty pro hodnotící stupnici

Rozsah hodnotící stupnice (-)	$y_{min}$	$y_{max}$
		1
Kritéria	$x_{min}$	$x_{max}$
$f_A$ (%)	-10	10
$f_B$ (mW/lm)	0	-0,5
$f_C$ (%)	0	-30
$f_D$ (%)	20	40

Hodnotící stupnice podle tabulky 1 přiřazuje všem kritériím hodnocení 1 až 5, kdy meze nastavují hodnocení 1 pro standardní denní světlo D50 pro kritéria B - D. U kritéria A dosahuje standardní světlo D50 známky 3 z důvodu velkého podílu obsahu spektrální hustoty zářivého toku v rozsahu 380-455 nm, které by podle S. Tempa mělo být co nejvíce minimalizováno. Z jednotlivých hodnocení lze vypočítat aritmetický či vážený průměr, který by přiřádal jednotlivým kritériím určitou váhu. Vážený průměr lze vypočítat následujícím vztahem

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n v_i y_i}{\sum_{i=1}^n v_i} = \frac{v_A y_A + v_B y_B + v_C y_C + v_D y_D}{v_A + v_B + v_C + v_D} \tag{7}$$

kde  $v_i$  jsou váhové koeficienty. V této metodice jsou tyto koeficienty rovny 1 a výsledná hodnotící hodnota se počítá jako aritmetický průměr. S budoucími poznatky lze tyto váhové koeficienty měnit. Z předložené práce profesora není jednoznačně dáno, jaké váhy jednotlivá kritéria mají, proto byly ponechány jako rovnocenné.

V následující tabulce jsou uvedeny příklady tří plnospektrálních svítidel podle označení jejich výrobců a jejich hodnocením. V posledním sloupci je standardní světlo D50.



Tabulka 3 Příklady výsledků hodnocení vybraných světelných zdrojů

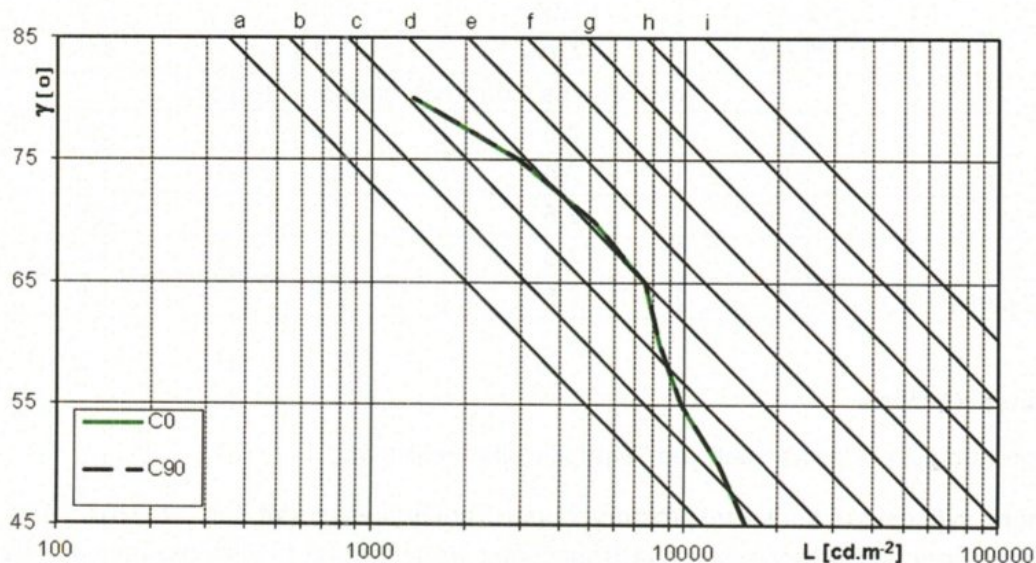
Kritéria	Hodnotící ukazatelé			
	Model 1	Model 2	Model 3	D50
$f_A$ (%)	-7%	-2%	-4%	0%
$f_B$ (mW·lm <sup>-1</sup> )	-0,06	-0,17	0,13	0,0
$f_C$ (%)	-23%	-12%	-13%	0%
$f_D$ (%)	40,5%	27,7%	25,2%	0%
	Převědno na jednotnou hodnotící stupnici			
Hodnocení „A“ (-)	1,7	2,6	2,2	3,0
Hodnocení „B“ (-)	1,5	2,4	1,0	1,0
Hodnocení „C“ (-)	4,0	2,6	2,7	1,0
Hodnocení „D“ (-)	5,0	2,5	2,0	1,0
Výsledné hodnocení (-)	3,0	2,5	2,0	1,5

### 11.7 Další hodnotící kritéria

K hodnotícím kritériím dle profesora Shelbyho Templa je vhodné přidat:

**Hodnocení oslnění:** výpočet pro konkrétní prostory, doporučení nepřesáhnout hodnotu UGR = 19. V první fázi lze použít orientační čáry mezních jasů spočítané pro jednotlivé hladiny osvětlení a třídy omezení oslnění.

Třída	Hladina osvětlení [lx]									UGR
	1000	500	300							
1			1000	500	300					16
2					1000	500	300			19
3							1000	500	300	22
Křivka	a	b	c	d	e	f	g	h	i	25



úhel [°]	Rovina C0		Rovina C90	
	I [cd]	L <sub>0</sub> [cd.m <sup>-2</sup> ]	I [cd]	L <sub>90</sub> [cd.m <sup>-2</sup> ]
45	73,3	15886,9	73,3	15886,9
50	54,1	12898,8	54,1	12898,8
55	36,9	9846,1	36,9	9846,1
60	27,3	8352,5	27,3	8352,5
65	20,7	7506,6	20,7	7506,6
70	11,5	5153,1	11,5	5153,1
75	5,0	2960,7	5,0	2960,7
80	1,6	1368,0	1,6	1368,0
85	0,0	0,0	0,0	0,0

Obrázek 1a Tabulka 4 a 5 Ukázka zakreslení čáry jasů svítidla do systému mezních čar jasů UGR

Na Obrázku 1 a Tabulkách 4 a 5 je ukázka velmi jednoduché reprezentace jasového průběhu aktivní plochy svítidla v různých směrech pohledu a průběhy mezních jasů pro jednotlivé třídy osvětlení a oslnění. Uvedené svítidlo by vyhovovalo pro hladinu osvětlení 300 lx a UGR = 19. Diskutabilní by bylo dodržení UGR 19 pro hladinu osvětlení 500 lx. Upřesnění UGR je však možné pouze výpočtem pro konkrétní prostor a vybrané svítidlo. Pokud by se toto kritérium aplikovalo, je třeba zadávat pro jaký prostor je svítidlo určeno – rozměry místnosti, činitele odrazu stěn, stropu a podlahy a jaká je požadovaná hladina osvětlenosti. Dle platné normy ČSN EN 12464-1 (květen/2022) je pro školní učebny (dle tabulky 44 ve výše zmiňované normě) doporučena hodnota hladiny udržované osvětlenosti 500 lx a více. Kritéria tohoto druhu by měl určit hygienik, popř. příslušný zdravotní ústav a měla by být dodržována. S vysokou pravděpodobností budou limit UGR splňovat svítidla s průběhem jasů dle čáry c (Obrázek 1).

**Světelný tok** – v souvislost s oslněním lze zjednodušit výběr svítidla také omezením světelného toku pro standardní pohledové svítidlo o velikosti 600 x 600 mm nebo 1200 x 300 mm a to tokem do



5000 lm, což odpovídá jasů ideálního rozptylovače cca 4500 cd.m<sup>-2</sup>. Tato podmínka je nutná, nikoliv postačující a může eliminovat příliš jasná svítidla, která by potenciálně oslňovala. Tyto svítidla s tokem nad 5000 lm je vhodné z testu vyřadit, neboť je vysoká pravděpodobnost, že nevyhoví ani metodice UGR.

**Hodnocení reprodukce barev** – rozpoznávání barev: indikátor CRI by měl být nahrazen indikátorem CFI. Norma ČSN EN 12 464-1 pro učebny požaduje  $R_o$  (CRI) alespoň 80. S ohledem na současné technologie LED a plnospektrální zdroje, které jsou předmětem hodnocení podle této metodiky, lze doporučit, aby zdroje měly CRI alespoň 90 a za doporučenou hodnotu u plnospektrálních zdrojů lze považovat zdroje s CRI nad 95 včetně. Opět lze nastavit význam kritéria příslušnou váhou a zápočtem do známek, kdy zdroje s CRI 95 a více by mohly být hodnoceny známkou 1 a zdroje s CRI menší než 80 známkou 5.

**Náhradní teplota chromatičnosti** – dle doporučení profesora Templa by se teplota chromatičnosti, resp. náhradní teplota chromatičnosti měla co nejvíce blížit světlu D50. Toto kritérium přímo ovlivňuje hodnocení dle navržené metodiky – kritérium d. Smysl má zařadit do výběru pouze zdroje s  $T_{cp}$  v intervalu 4500 – 5500 K.

**Hodnocení stability světla** – kolísání, index míhání, činitel vlnitosti světla. Toto kritérium je vhodné ověřit u zdrojů s napájením pulsně šířkovou modulací nebo jiným frekvenčně řízeným regulátorem, aby případný zdroj nebo svítidlo nezpůsobil interference světla v časové oblasti za vzniku kolísajícího světla, které může být zdrojem psychické nepohody. Světlo by mělo mít konstantní intenzitu bez kolísání a to lze hodnotit pomocí tzv. flicker indexu. Flicker index je dnes hodnocen poměrně komplexní a rozsáhlou metodikou (viz. např. IEC TR 61547-1), která není předmětem tohoto dokumentu. Pro zjednodušení hodnocení lze použít prohlášení výrobce značkou „*Flicker free*“, kterou by měly disponovat zdroje bez blikání. Takový zdroj lze hodnotit známkou 1 a ostatní známkou 5.

## 12. PROTOKOL O MĚŘENÍ

Protokol o měření spektrální hustoty zářivého toku a vyhodnocení ukazatelů podle této metodiky musí obsahovat následující informace

- identifikační číslo protokolu;
- objednatel;
- datum a čas měření;
- podmínky a postup měření;
- informace o použitých měřicích přístrojích;
- výsledky měření;
- vyhodnocení měření, porovnání výsledků s požadavky;

Protokol o provozním měření spektrálních vlastností osvětlení má mít jedinečné kódové označení pro jeho jednoznačnou identifikaci a jednotlivé strany protokolu mají být očíslovány. Obsahová struktura protokolu o provozním měření spektrálních vlastností osvětlení může mít následující podobu:

### A. Identifikační údaje

- A1 Název projektu;
- A2 Objednatel;
- A3 Zpracovatel;
- A4 Druh měření (měřené veličiny, typ měření)
- A5 Osoby provádějící měření;
- A6 Datum a čas měření;
- A7 Evidenční číslo

## B. Podklady

- B1 Seznam vstupních podkladů;
- B2 Seznam použitých technických norem a právních předpisů;

## C. Svítidlo nebo světelný zdroj

- C1 Typ, druh svítidla světelného zdroje;
- C2 Údaje o světelném toku, indexu podání barev, teplotě chromatičnosti, náhradní teplotě chromatičnosti, flicker indexu (popř. činiteli vlnitosti světla), maximálním jase vyzařovací plochy, průběhu jasu vyzařovací plochy v úhlech 45-85 stupňů ve fotometrických rovinách C0 a C90;
- C3 Ovládací a řídicí zařízení a jejich nastavení;
- C4 Stav údržby;

## D. Parametry prostředí

- D1 Teplota, tlak, vlhkost;
- D2 Napájecí napětí;

## E. Měřicí přístroje

- E1 Hlavní měřicí přístroj (kulový integrátor se spektrometrem), typ, výrobce, číslo, kalibrace;
- E2 Pomocné měřicí přístroje (voltmetry, teploměry, barometry, vlhkoměry);

## F. Příprava měření

- F1 Příprava svítidla / světelného zdroje;
- F2 Příprava měřicích přístrojů;

## G. Měření

- G1 Nastavené parametry napájení;
- G2 Naměřené hodnoty spektrální hustoty záření;

## H. Vyhodnocení měření

- H1 Vyhodnocení jednotlivých hodnotících ukazatelů;
- H2 Převod naměřených hodnot na hodnotící stupnici;
- H3 Zhodnocení výsledků;
- H4 Podpis odpovědné osoby;

## Přílohy

- P1 Naměřené hodnoty spektrálních charakteristik zdroje / svítidla ;
- P2 Katalogové listy svítidel;
- P3 Kalibrační listy hlavních měřicích přístrojů;
- P4 Potvrzení o odborné způsobilosti osoby zodpovědné za měření;

Naměřené hodnoty s nejistotami se porovnají s požadavky technických norem, právních předpisů, státní správy, případně s požadavky projektu. Podle výsledků měření mohou nastat čtyři následující situace:

- a) Pokud je zjištěná hodnota  $i$  s intervalem rozšířené nejistoty ( $\pm U$ ) sledovaného parametru v požadované toleranci, považuje se to za **vyhovující** stav.
- b) Pokud je zjištěná hodnota  $i$  s intervalem rozšířené nejistoty ( $\pm U$ ) sledovaného parametru mimo požadovanou toleranci, považuje se to za **nevyhovující** stav.



- c) Vyskytne-li se případ, že hodnota sledovaného parametru je v toleranci, ale horní mez intervalu rozšířené nejistoty je mimo toleranci, nelze tvrdit, že stav je **vyhovující**.
- d) Vyskytne-li se případ, že hodnota sledovaného parametru je mimo toleranci, ale dolní mez intervalu rozšířené nejistoty je v toleranci, nelze tvrdit, že stav je **nevyhovující**.

### 13. ZÁVĚR

Metodika je v současné podobě zaměřena dle zadání převážně na hodnocení plnospektrálních zdrojů světla dle posudku profesora Shelby Temple. Další doporučení, dané platnými normami pro osvětlování vnitřních prostor jsou uvedeny v kapitole 11.7. V celkovém hodnocení dané instalace by se této metodice měla věnovat specifická váha a mohou být přidány další hodnotící kritéria, aby dané osvětlovací zařízení bylo komplexně funkční. Váha jednotlivých kritérií je však z pohledu technika definovatelná se značnou nejistotou výsledku. Je třeba dlouhodobého sledování a monitorování jednotlivých instalací a průběžného doladování hodnotících kritérií a v prvním kroku postačuje měnit váhy jednotlivých kritérií v rozsahu  $\langle 0; 1 \rangle$ .

Závěrem lze konstatovat, že uvedený postup měření a hodnocení zdrojů na základě spektrální analýzy vyzařovaného světla je významným krokem ke zkvalitnění osvětlovacích soustav, a to s podporou světově uznávaného odborníka s řadou praktických medicínských zkušeností (prof. Shelby Temple). Je však třeba brát v úvahu, že v daném materiálu prof. Temple jsou jeho měření spektrometrem jen orientační a o jím uvedené hodnoty se lze opírat pouze relativně, nikoli absolutně.

Další zpřesnění metodiky by bylo možné na základě oprav měření v souladu s technickou praxí a další konzultací s uvedeným odborníkem. To však vyžaduje větší časové nároky a systematickou badatelskou činnost. Metodika, tak jak je uvedena, je tedy použitelným nástrojem pro hodnocení zdrojů světla, ale s uvedenými omezeními.