

- [6] L. Nozka, L. Adamczyk, G. Avoni, A. Brandt, P. Buglewicz, E. Cavallaro, G. Chiodini, L. Chytka, K. Ciesla, P. M. Davis, M. Dyndal, S. Grinstein, P. Hamal, M. Hrabovsky, K. Janas, K. Jirakova, M. Kocian, T. Komarek, K. Korcyl, J. Lange, D. Mandat, V. Michalek, I. Lopez Paz, D. Northacker, M. Rijssenbeek, L. Seabra, P. Schovanek, R. Staszewski, P. Swierska, and T. Sykora, "Construction of the optical part of a time-of-flight detector prototype for the AFP detector," *Optics Express* **24**(24), 27951–27960 (2016).
- [7] J. Lange et al., "Beam Tests of an Integrated Prototype of the ATLAS Forward Proton Detector," *J. Instrum.* **11**(09), P09005 (2016).
- [8] L. Chytka, G. Avoni, A. Brandt, E. Cavallaro, P. M. Davis, F. Förster, M. Hrabovsky, Y. Huang, K. Jirakova, M. Kocian, T. Komarek, K. Korcyl, J. Lange, V. Michalek, L. Nozka, I. Lopez Paz, M. Rijssenbeek, P. Schovanek, T. Sykora and V. Urbasek, "Timing resolution studies of the optical part of the AFP Time-of-flight detector," *Optics Express* **26**(7), 8028–8039 (2018).

Mgr. Tomáš Komárek, Mgr. Libor Nožka, Ph.D., Ing. Ladislav Chytka, prof. RNDr. Miroslav Hrabovský, DrSc.  
Univerzita Palackého, Přírodovědecká fakulta, RCPTM, Společná laboratoř optiky Univerzity Palackého a Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky, 17. listopadu 12, 771 46 Olomouc, e-mail: tomas.komarek@slo.upol.cz, libor.nozka@upol.cz, tel.: 585 631 533

*Jedná se o vědecký článek.*

Jan ROIK, Karel LEMR  
RCPTM, Společná laboratoř optiky Univerzity Palackého a Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky, Olomouc

## Testování a kalibrace RGB kolorimetrů

*Cílem této práce bylo testování a následná kalibrace RGB kolorimetrů. RGB kolorimetry představují cenově dostupné nástroje umožňující provádět celou řadu kolorimetrických měření. Cílem naší práce bylo ověření jejich přesnosti a vypracování metody jejich kalibrace. Ukazujeme, jak námi navržená metoda kalibrace umožňuje pracovat i se sondami, které již samy o sobě vlivem hardwarových chyb poskytují nepřesná data.*

**Klíčová slova:** RGB kolorimetr, kalibrace, monochromátor, kalibrační matice

### ÚVOD

V tomto příspěvku, který vychází z bakalářské práce [1], se zabýváme především barvami a kolorimetry, což jsou zařízení, kterými můžeme barvy měřit. Pod pojmem barva si asi každý z nás něco představí, a to od duhy na obloze až po pastelky. Jsou různé pohledy, jak se na pojem barva lze dívat. Jedna z definic pojmu barva zní:

*"The property possessed by an object of producing different sensations on the eye as a result of the way it reflects or emits light."* (Převzato z English Oxford living dictionaries [2].)

„Vlastnost, kterou disponuje objekt, protože odráží nebo vyzařuje světlo a tyto děje vyvolávají různé vjemy v oku.“

Barvy jsou nedílnou součástí našich životů a jsou zakomponovány do všech aspektů našeho života. Mohou dokonce ovlivňovat naše emoce a prožitky [3]. Lidé některým barvám přiřadili určité funkce, jako například na semaforech, a proto téměř každý z nás má červenou spojenou s významem pozor nebo stát. Semaforey v elektronické podobě lidé využívají již od roku 1914 [4]. Dalším zajímavým faktem je že, každý z nás má svou takřka unikátní barvou v podobě duhovky oka, jejíž barva může ovlivnit kvalitu našeho života, a to v podobě náchylnosti na nemoci [5]. Naše kultura si také spojila některé barvy s různými událostmi, například černou s pohřbem, červenou se svátkem svatého Valentýna a zelenou se dnem svatého Patrika. Každý z nás má nějakou svou

oblíbenou barvu. Touto barvou se chce obklopovat, a to třeba v podobě oblečení, které nosí, či barvy auta, které vlastní. Každá barva však existuje v mnoha barevných odstínech. Vnímání barev je často velmi subjektivní, proto je potřeba umět jednotlivé barvy od sebe rozeznat a určitým způsobem kvantifikovat, tedy měřit. Takové měření má mnoho aplikací v různých oblastech. Představme si, že bychom dostali balení Lega a zelené kostičky by nebyly všechny stejné, ale každá z nich by měla jiný odstín zelené. Těmto problémům se předchází právě měřením barev. Aby byla měření co možná nejpřesnější, je zapotřebí co nejdokonalější kalibrace zařízení, kterým barvy měříme.

K měření barev slouží kolorimetry, případně spektrometry. My jsme se v této práci zabývali testováním a kalibrací kolorimetrů, které mají praktické využití při kalibraci digitálních zařízení. Našimi testovanými kolorimetry byly sondy Colormunki a II od firmy X-Rite. Zvláště jejich cenová dostupnost přitahuje pozornost nejrůznějších profesionálů v oblastech grafiky, fotografie nebo tisku. Pomocí našich sond jsme proměřili celé spektrum viditelné oblasti barev a následně z těchto výsledků určíme nevhodnější způsob kalibrace.

Pro kalibraci se používají různé metody [6]. Jedna z nich spočívá v nalezení univerzální konstanty, kterou vynásobíme všechny získané údaje. Další, sofistikovanější způsob spočívá v nalezení  $3 \times 3$

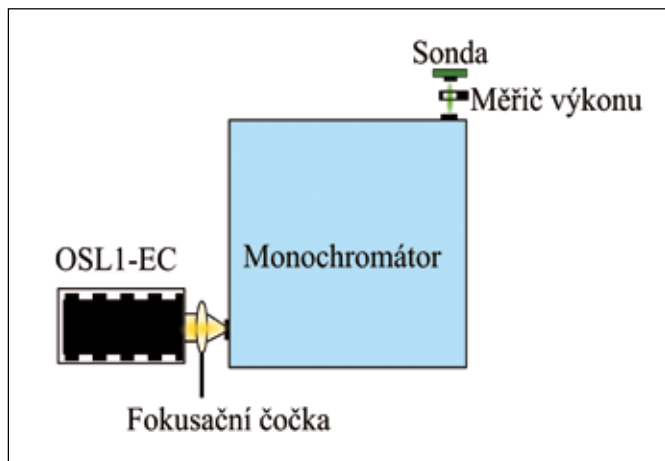
matice, která by měla být účinnější než pouhá konstanta díky tomu, že kompenzuje jednotlivé odchylky CIE XYZ souřadnic zvlášť. Je ovšem rozdíl mezi způsoby, kterými se tato matice hledá. Jeden ze způsobů hledání je takový, že známe zdroj světla a víme jaké hodnoty CIE XYZ souřadnic na něm máme naměřit. Z těchto hodnot poté získáme korekci, která je ovšem pro jiné zdroje nepřesná [7]. Jiný způsob je takový, že provedeme měření na RGB displeji, o kterém předpokládáme, že správně namíchal měřené barvy, a poté provedeme korekci. Tato metoda je vhodná, pokud nemáme přístup ke spektrometru [8]. Metoda, kterou budeme kalibrační matici hledat v této práci je tato: pomocí monochromátoru rozdělíme celé barevné spektrum s krokem 5 nm a následně provedeme měření pro každou část spektra. Touto metodou bychom měli získat kalibraci, která bude velice účinná a zároveň univerzální pro všechny zdroje světla. Od naší kalibrační metody si slibujeme, že by mohla být schopna upravit i vadné sondy tak, abychom s nimi poté mohli provádět relativně přesná měření.

## 1. MĚŘENÍ FUNKCE TRICHROMATICKÝCH ČLENITELŮ

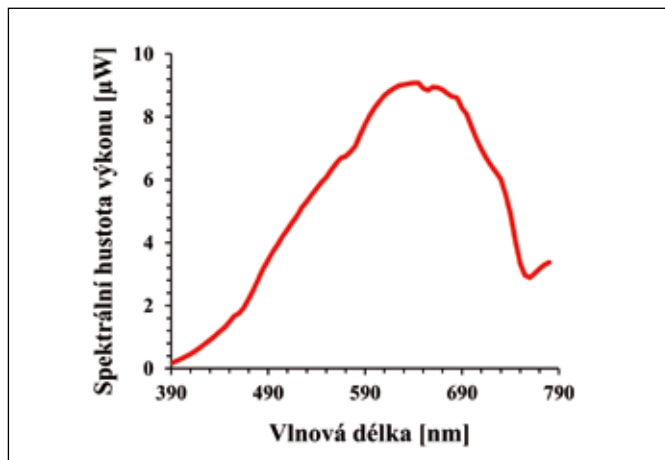
Měření jsme provedli s využitím kontinuálního zdroje světla a monochromátoru. Provedli jsme měření funkcí trichromatických členitelů pro sondy: Colormunki a II. Naše experimentální sestava byla tvořena zdrojem světla OSL1-EC, fokusační čočkou, monochromátorem, měřičem výkonu a dvěma sondami Colormunki a II. Schéma této sestavy je znázorněno na obr. 1.

## 2. REALIZACE MĚŘENÍ

Nejdříve jsme nechali zdroj světla zahřát, aby byl jeho výkon a spektrum dostatečně stabilní. Poté jsme zkorigovali šterbiny na monochromátoru tak, aby svazek vycházejícího světla měl spektrální tloušťku 5 nm. Následně jsme nechali měřič výkonu přeměřit



Obr. 1 Experimentální sestava



Obr. 2 Hodnoty spektrální hustoty výkonu

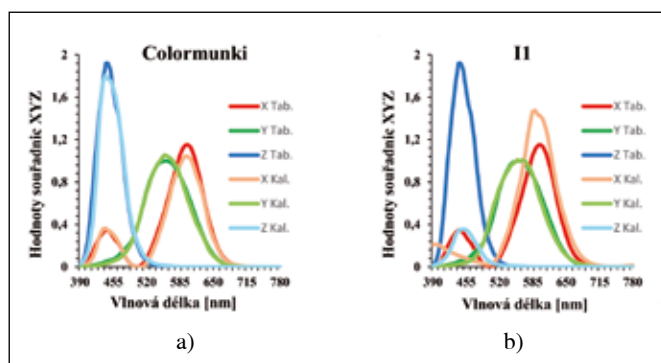
celou oblast vlnových délek, na kterých jsme chtěli určit funkce trichromatických členitelů našich sond. Jde o oblast vlnových délek 390 nm – 780 nm a měření bylo provedeno s krokem 5 nm. Spektrální hustotu výkon  $P(\lambda)$  potřebujeme změřit, jelikož náš zdroj světla není ekvivalentní. Kvůli tomu kalibrace nelze provést jednoduše vynásobením výsledků sond jedinou konstantou, ale sondami naměřené hodnoty musíme vydělit příslušnými hodnotami výkonu. Graficky jsme naměřené hodnoty znázornili na obr. 2.

Pak jsme přikročili k samotnému určení funkcí trichromatických členitelů našich sond. Sondy při tomto měření byly nastaveny v emisivním modu. Měření jsme provedli jak pro sondu Colormunki, tak i pro sondu II. Naměřené hodnoty souřadnic CIE XYZ jsme museli nejprve upravit, abychom s nimi mohli dále pracovat. V prvním kroku jsme provedli korekci na spektrální výkon zdroje vydělením každé z naměřených hodnot příslušnou hodnotou spektrální hustoty výkonu. Ve druhém kroku jsme fitováním našli konstantu  $I_0$ , abychom provedli korekci na absolutní výkon zdroje a ztráty v experimentálním uspořádání. Tyto korekce provádíme, abychom získali maximální překryv s tabelovanými hodnotami funkcí trichromatických členitelů CIE XYZ. Tyto úpravy vedou ke korekci  $\{XYZ\}_c(\lambda)$  experimentálních souřadnic. Tuto proceduru lze vyjádřit vzorcem:

$$\{XYZ\}_c(\lambda) = \frac{I_0}{P(\lambda)} \{XYZ\}_p(\lambda).$$

Ve vztahu (1)  $I_0$  reprezentuje fitováním nalezenou konstantu,  $\{XYZ\}_p(\lambda)$  jsou námi naměřené souřadnice a  $P(\lambda)$  odpovídá spektrální hustotě výkonu.

Pro sondu Colormunki jsme fitováním určili konstantu  $I_0 = 0,016$  a pro sondu II  $I_0 = 0,013$ . Známe tedy všechny potřebné údaje pro určení  $\{XYZ\}_c(\lambda)$  obou sond.



Obr. 3 Odchylky hodnot souřadnic  $\{XYZ\}_c$  kalibrováných konstantou  $I_0$  od tabelovaných hodnot

Jak můžeme vidět z obr. 3, hodnoty maxim na jednotlivých souřadnicích se neshodují s tabelovanými hodnotami. Tento rozdíl je u sondy Colormunki přijatelný, ale u sondy II je výrazný. Navíc u sondy II můžeme také vidět horizontální odchylku, čímž je myšleno to, že hodnoty maxim na jednotlivých souřadnicích nejsou pouze rozdílné v hodnotách, ale jsou také posunuty oproti tabelovaným hodnotám na ose vlnových délek.

S výsledky kalibrace pomocí konstanty  $I_0$  jsme nebyli spokojeni, a proto jsme hledali efektivnější způsoby kalibrace. Naprosto dokonalou korekci bychom získali tak, že bychom určili konstanty  $I_{0,X,Y,Z}(\lambda)$ . Tímto je myšleno nalezení individuálních konstant pro všechny tři souřadnice CIE XYZ na všech vlnových délkách. Tímto bychom dosáhli naproste shody s tabelovanými hodnotami. Tento postup však v našem případě nemůžeme uplatnit. To je zapříčiněno tím, že pro určení těchto konstant je zapotřebí znát příslušné vlnové délky. To je problém, protože naše sondy neumí vlnovou délku určit. Proto jsme zkusili kalibraci pomocí matice  $\mathbf{H}$ . Princip této metody spočívá v tom, že nalezneme fitováním matici 3×3, jejíž

diagonální členy budou korigovat hodnotu jednotlivých souřadnic CIE XYZ a ostatní členy budou korigovat horizontální odchylku. Poté touto maticí  $\mathbf{H}$  nahradíme konstantu  $I_0$  a takto vznikne vzorec:

$$\{XYZ\}_c(\lambda) = \frac{\mathbf{H}}{P(\lambda)} \{XYZ\}_p(\lambda).$$

Pomocí něj jsme upravili naše naměřené hodnoty. Graficky jsou výsledky této korekce znázorněny na obr. 4.

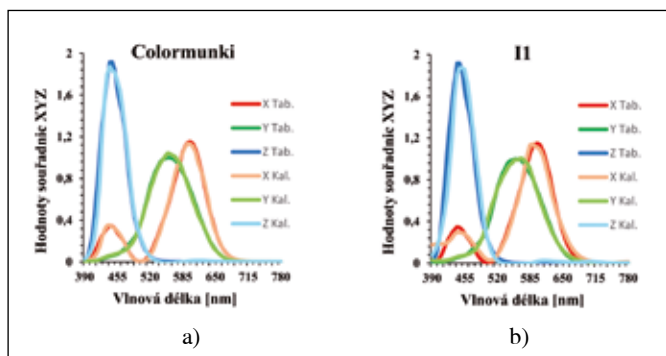
Fitováním určená matice pro sondu Colormunki:

$$\mathbf{H} = 0,016 \begin{pmatrix} 1,1 & 0 & 0 \\ 0 & 0,9 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Fitováním určená matice pro sondu I1:

$$\mathbf{H} = 0,013 \begin{pmatrix} 0,77 & 0 & 0,62 \\ 0 & 0,92 & 0,08 \\ 0 & -0,08 & 5,54 \end{pmatrix}.$$

Konstanty vytknuté před obě matice se shodují s konstantami korekce na absolutní výkon zdroje.



Obr. 4 Odchylky hodnot souřadnic  $\{XYZ\}_c$  kalibrovaných maticí  $\mathbf{H}$  od tabelovaných hodnot

### 3. SOUHRN VÝSLEDKŮ

Z měření absolutních hodnot souřadnic CIE XYZ jsme zjistili, že sonda Colormunki podává uspokojivé výsledky. Když jsme naměřené a spektrální hustotou výkonu vydělené hodnoty souřadnic CIE XYZ vynásobili konstantou  $I_0(1)$ , shodovaly se s tabelovanými hodnotami takřka na všech vlnových délkách. Odchylky byly patrné pouze v maximech hodnot souřadnic CIE XYZ (obr. 3a). Pro souřadnice X a Z byly naměřené hodnoty maxim menší než tabelované hodnoty. Hodnota souřadnice X byla menší o 0,11 a souřadnice Z o 0,18. V případě souřadnice Y byla naměřená hodnota vyšší než tabelovaná o 0,01. Horizontální odchylka nebyla detekována vůbec. Pro překryvy námi naměřených hodnot s tabelovanými hodnotami byly stanoveny koeficienty určitosti pro jednotlivé souřadnice takto:  $X = 0,985$ ;  $Y = 0,995$ ;  $Z = 0,985$ . Dále jsme pro sondu Colormunki našli fitováním matici  $\mathbf{H}$ , která snížila odchylky naměřených hodnot také v maximech jednotlivých souřadnic CIE XYZ. Odchylky po korekci pomocí matice  $\mathbf{H}$  byly pro maximální hodnoty rovny  $X = 0,02$ ;  $Y = 0,01$ ;  $Z = 0,05$ . Koeficienty určitosti překryvu jsou po této korekci pro jednotlivé souřadnice  $X = 0,997$ ;  $Y = 0,997$ ;  $Z = 0,987$ . Je zde patrné zlepšení. Tyto výsledky jsme graficky znázornili na obr. 4a.

V případě sondy I1 byly naměřené hodnoty méně přesné než v případě sondy Colormunki. Když jsme naměřené a spektrální hustotou výkonu vydělené hodnoty souřadnic CIE XYZ vynásobili konstantou  $I_0(2)$ , shodovaly se s tabelovanými hodnotami pouze hodnoty souřadnice Y (obr. 3b). V případě souřadnice X jsme

naměřili hodnotu v maximu vyšší než tabelovanou, a to o 0,2. Pro souřadnici Z jsme ovšem naměřili hodnoty několika násobně nižší než hodnoty tabelované. Rozdíl v maximu činil 1,56. Pro tuto sondu jsme detekovali také horizontální odchylku. Pro překryvy námi naměřených hodnot s tabelovanými hodnotami byly stanoveny koeficienty určitosti pro jednotlivé souřadnice  $X = 0,817$ ;  $Y = 0,991$ ;  $Z = 0,156$ . Tímto se nám potvrdil předpoklad, že sonda I1 je vadná. Dále jsme pro sondu I1 našli fitováním matici  $\mathbf{H}$ , která snížila odchylky naměřených hodnot jak v maximech jednotlivých souřadnic CIE XYZ, tak horizontální odchylku souřadnic CIE XYZ na ose vlnových délek. Odchylky po korekci pomocí matice  $\mathbf{H}$  byly pro maximální hodnoty rovny  $X = 0,01$ ;  $Y = 0,02$ ;  $Z = 0,12$ . Koeficienty určitosti překryvu jsou tedy po této korekci pro jednotlivé souřadnice následující:  $X = 0,977$ ;  $Y = 0,995$ ;  $Z = 0,965$ . Jde tedy o podstatné zlepšení. Tyto výsledky jsme graficky znázornili na obr. 4b.

### 4. OVĚŘENÍ KOREKCE NA PALETĚ BAREV

Na závěr jsme ověřili správnost naší korekce pomocí matice  $\mathbf{H}$ , a to tak, že jsme proměřili testovací paletu barev doporučenou výrobcem sond X-Rite pomocí spektrometru a výsledky následně porovnali s výsledky naměřenými sondami. Testovací paleta barev použitá při těchto měřeních je znázorněna na obr. 5. Všechny 24 testovaných barev zobrazených na LCD monitoru jsme přeměřili spektrometrem a následně i sondami Colormunki a I1. Poté jsme hodnoty naměřené sondami opravili pomocí kalibračních matic. Tyto kalibrované hodnoty souřadnic CIE XYZ jsme převedli na souřadnice CIE  $uv$ . Tento postup jsme zvolili, protože v souřadnicích CIE  $uv$  jsou rozdíly ekvidistanční oproti rozdílu v souřadnicích CIE XYZ, a proto pro znázornění odchylek budou názornější. Vzorec pro převod mezi souřadnicemi:

$$u = \frac{4x}{x + 15y + 3z}, \quad v = \frac{9y}{x + 15y + 3z}. \quad (3)$$

Nyní přistoupíme k samotnému porovnávání odchylek mezi spektrometrem a našimi sondami. Vzorec pro výpočet odchylek od spektrometru je

$$\Delta D = \sqrt{(u_c - u_s)^2 + (v_c - v_s)^2}. \quad (4)$$

V tomto vzorci  $u_c, v_c$  reprezentují hodnoty souřadnic naměřené kolorimetrem a  $u_s, v_s$  jsou hodnoty souřadnic naměřené spektrometrem.

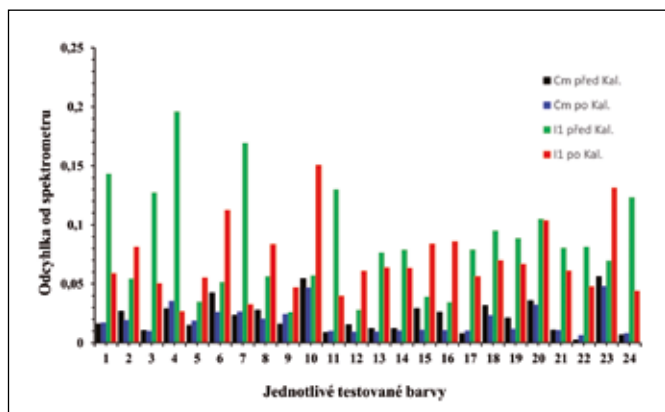


Obr. 5 Testovací paleta barev výrobce X-Rite [9]

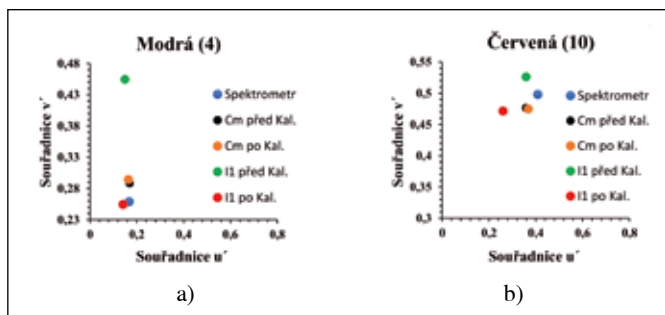
Výpočet odchylek jsme provedli postupně pro každou z 24 testovaných barev. Graficky jsou hodnoty odchylek znázorněny na obr. 6. Z tohoto grafu je patrné, že jak pro sondu Colormunki, tak pro sondu I1 jsou hodnoty odchylek po korekci menší než hodnoty odchylek bez korekce. Tento trend není bohužel pravidlem u všech testovaných barev. Pro sondu Colormunki jsme naši kalibraci snížili

průměrnou hodnotu odchylky o 17,3 % a pro sondu II o 15,7 %. Zajímavé výsledky jsou interpretovány pomocí obr. 7a. Lze zde pozorovat, že pro testovanou barvu 4 (modrou) se odchylka sondy II od odchylky sondy Colormunki po kalibraci snížila 7krát. Oproti tomu na obr. 7b je znázorněn případ, kdy kalibrace výrazně zhoršila odchylku sondy II, ale i po zhoršení má sonda II pouze 3krát horší odchylku než sonda Colormunki, což je důležité pro srovnání, jelikož sondu Colormunki považujeme za spolehlivou.

Tudíž výrazné číselné zhoršení odchylek po kalibraci u sondy II v případě barev (6, 10, 20, 23) není tak podstatné, protože je důležité vzít v úvahu srovnání těchto odchylek s odchylkami sondy Colormunki. Ze srovnání plyne, že pro barvy (6, 10, 20, 23) nejsou odchylky sondy II ani po zhoršení kalibrací výrazně větší než odchylky sondy Colormunki. Tyto odchylky jsou maximálně trojnásobné. Další zajímavý výsledek je, že před kalibrací byla průměrná hodnota odchylek sondy II 6krát větší než u sondy Colormunki, zatímco po kalibraci průměrná hodnota odchylek byla pouze 4krát větší.



Obr. 6 Odchylky testovaných kolorimetrů od spektrometru



Obr. 7 Porovnání hodnot souřadnic CIE  $uv$  naměřených kolorimetrem s hodnotami naměřenými spektremem

## 5. ZÁVĚR

Z výše provedených měření plyne, že metoda korekce pomocí jedné konstanty  $I_0$  je vhodná pro zařízení, která nejsou vadná a nepotřebují velkou korekci. Korekcí maticí **H** jsme dosáhli zpřesnění měření oproti korekci pomocí konstanty  $I_0$ . Tento rozdíl byl však podstatně výraznější v případě vadné sondy II, se kterou jsme schopni s použitím kalibrace maticí **H** provádět měření téměř srovnatelná jako se sondou Colormunki. Dále se ukázalo, při ověřování účinnosti kalibrace na testovací paletě barev pomocí matice **H**, že se odchylky našich kolorimetrů snížily o 17,3 % v případě sondy Colormunki a o 15,8 % v případě sondy II. Důležitým zjištěním je také to, že se průměrná odchylka sondy II po korekci přiblížila sondě Colormunki, a to o 33 %. Nutno ovšem dodat, že testovací paleta barev obsahuje pouze barvy z oblasti gamutu CIE sRGB a naše sondy jsou kalibrovány pro celý gamut CIE XYZ. Z tohoto faktu plyne, že naše kalibrace by byla účinnější, pokud by paleta testovaných barev obsahovala také barvy ze širšího gamutu. Největší výhodou naší kalibrace je skutečnost, že ji lze využít pro všechny zdroje světla, a ne pouze pro zdroj, na kterém kalibrace vznikla. Další výhodou je tvar kalibrace. Jde o matici 3×3, což je výhodné zejména pro běžné uživatele sond, jelikož existuje program, do kterého lze kalibraci nahrát právě ve tvaru 3×3 matice. To může vést k tomu, že bychom mohli kalibrovat jakýkoli kolorimetr a sestavit pro něj kalibrační matici a následně by mohl jakýkoli uživatel s tímto programem kolorimetr efektivně využívat. Protože se tyto kolorimetry využívají především ke kalibraci monitorů, ocení tento přístup i uživatel bez hlubších znalostí problematiky kalibrace.

**Poděkování**  
Autoři děkují projektu LO1305 poskytnutým Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR.

## Literatura

- [1] J. Roik, „Testování a kalibrace RGB kolorimetrů“, bakalářská práce UP v Olomouci 2017.
- [2] *English Oxford living dictionaries: Colour* [online]. [cit. 2017-02-13]. Dostupné z: <https://en.oxforddictionaries.com/definition/colour>.
- [3] NAz, K. A. Y. A., and Helena Epps. „Relationship between color and emotion: A study of college students.“ *College Student J* 38.3 (2004): 396.
- [4] First electric traffic signal installed. *History.com* [online]. New York: A+E Networks, 2009 [cit. 2017-02-13]. Dostupné z: <http://www.history.com/this-day-in-history/first-electric-traffic-signal-installed>.
- [5] Seddon, Johanna M., et al. „Evaluation of an iris color classification system. The Eye Disorders Case-Control Study Group.“ *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 31.8 (1990): 1592–1598.
- [6] Gardner, J. L. „Tristimulus colorimeter calibration matrix uncertainties.“ *Color Research & Application* 38.4 (2013): 251–258.
- [7] Ohno, Yoshi, and Steven W. Brown. „Four-color matrix method for correction of tristimulus colorimeters—Part 2.“ *Color and Imaging Conference*. Vol. 1998. No. 1. Society for Imaging Science and Technology, 1998.
- [8] Eppeldauer, George. „Spectral response based calibration method of tristimulus colorimeters.“ *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology* 103.6 (1998): 615. Color Management System, Services & Software; X-Rite. Color Management System, Services & Software; X-Rite [online]. Dostupné z: <http://www.xrite.com/>.

Bc. Jan Roik, RCPTM, Společná laboratoř optiky Univerzity Palackého a Fyzikálního ústavu Akademie věd ČR, 17. listopadu 12, 772 07 Olomouc, jan.roik01@upol.cz

doc. Mgr. Karel Lemr, Ph.D., RCPTM, Společná laboratoř optiky Univerzity Palackého a Fyzikálního ústavu Akademie věd ČR, 17. listopadu 12, 772 07 Olomouc, k.lemr@upol.cz, tel.: 585 631 547

Jedná se o vědecký článek.