

SROVNÁNÍ KOLORIMETRICKÝCH ZKRESLENÍ SNÍMACÍCH SOUSTAV XYZ A RGB

Jan Kaiser, Emil Košťál
xkaiserj@feld.cvut.cz

ČVUT, Fakulta elektrotechnická, katedra Radioelektroniky
Technická 2, 166 27 Praha 6

1. Úvod

Článek se zabývá srovnáním kolorimetrických zkreslení snímacích soustav pracujících v různých kolorimetrických systémech – v kolorimetrickém systému RGB pracující konvenční snímací soustavy na straně jedné a nové soustavy pracující v kolorimetrickém systému XYZ na straně druhé. Jedná se hranolové světlořídící soustavy – snímací soustavy televizních kamer. Kritériem kolorimetrického zkreslení bylo zvoleno JND (Just Noticeable Difference) zahrnující jak barevnou, tak i jasovou složku zkreslení. Veškeré výpočty – generace testovacích barevných vzorků, kolorimetrické transformace, zkreslení atd. byly řešeny v prostředí Matlab 5.3. Výpočty se staly součástí podkladů úspěšného patentového řízení – hranolová světlořídící soustava XYZ byla patentována 19.4.2001 [1].

2. Kritérium kolorimetrického zkreslení JND

Nedostatkem dosavadní interpretace diferenciální rozlišovací schopnosti zraku při vyhodnocování přípustných barevných zkreslení je nerovnoměrnost její míry po ploše diagramu barev MKO. Nelineární transformací souřadnicové soustavy x, y diagramu barev MKO do nové souřadnicové soustavy u, v podle vztahů [2]

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}, \quad v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3} \quad (1)$$

byl vytvořen rovnoměrný diagram chromatičností CIÉuv. V tomto diagramu stejné geometrické vzdálenosti představují stejné rozlišitelné barevné difference. Odpovídající matematické vyjádření kolorimetrických diferencí se pak uvádí výpočtem jednotek jnd (just noticeable difference = právě pozorovatelná difference) podle vztahu

$$N = \sqrt{N_b^2 + N_y^2}, \quad (2)$$

kde N_b je barevná difference vyjádřená souřadnicemi u, v podle vztahu

$$N_b = \frac{\sqrt{(u_r - u_o)^2 + (v_r - v_o)^2}}{0,00384}, \quad (3)$$

a člen N_y v (2) představuje vliv jasové difference, který je definován

$$N_y = \frac{\log(Y_r) - \log(Y_o)}{0,0198}, \quad (4)$$

Ve výrazu (3) představují $(u_r - u_o)$ a $(v_r - v_o)$ difference souřadnic originální a reprodukované barvy. Jedna jednotka právě pozorovatelné barevné difference jnd podle výrazu (3) představuje v rovnoměrném diagramu CIEuv vzdálenost 0,00384, která se považuje za realistickou míru prakticky postřehnutelné barevné difference.

Ve výrazu (4) jsou Y_o a Y_r jasové hodnoty originálního a reprodukováného barevného vzorku. Jedna jednotka rozlišitelné jasové difference podle výrazu (4) je vyjádřena 2 % diferencí jasu srovnávaných vzorků.

Uvedené vyhodnocování kolorimetrických diferencí v souřadnicové soustavě u , v prostřednictvím jednotek jnd se nejčastěji používá pro účely barevné televize.

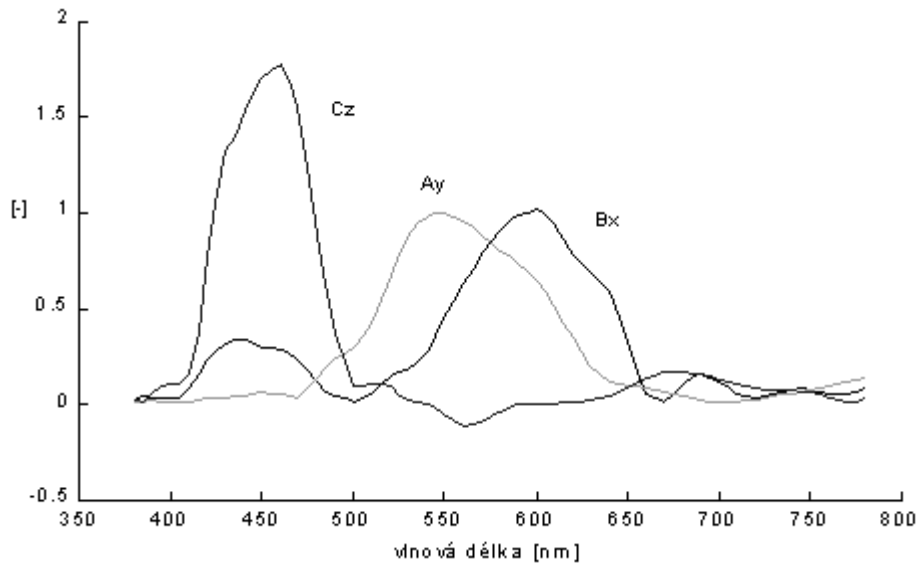
3. Testovací vzorky

Volbou testovacích vzorků (počtem a jejich spektrálními průběhy) můžeme výsledek kolorimetrického testu značně ovlivnit. Proto byla zvolena nejobsáhlejší sada profesionálně užívaných spekter - kompletní sada 1269 Munsellových spekter tabelovaných od 380 nm do 800 nm po 1 nm. Jsou to spektrofotometrem Perkin-Elmer lambda 9 UV/VIS/NIR změřená reflektanční spektra [3].

Správné barevné souřadnice jsou níže vynášeny tmavšími křížky. Barevné souřadnice zkreslené průchodem testovanou soustavou (snímací soustavou XYZ nebo snímací soustavou RGB) jsou vyneseny světlejšími kolečky.

4. Kolorimetrické zkreslení hranolové světlořídící soustavy XYZ

U hranolové světlořídící soustavy XYZ uvažujeme: její charakteristiky spektrálních citlivostí sledují námi dosažené aproximace ideálních spektrálních charakteristik. Tyto dosažené spektrální charakteristiky jsou výstupem návrhového programu Synopsys [4]. Jsou vyneseny na obr. 1.



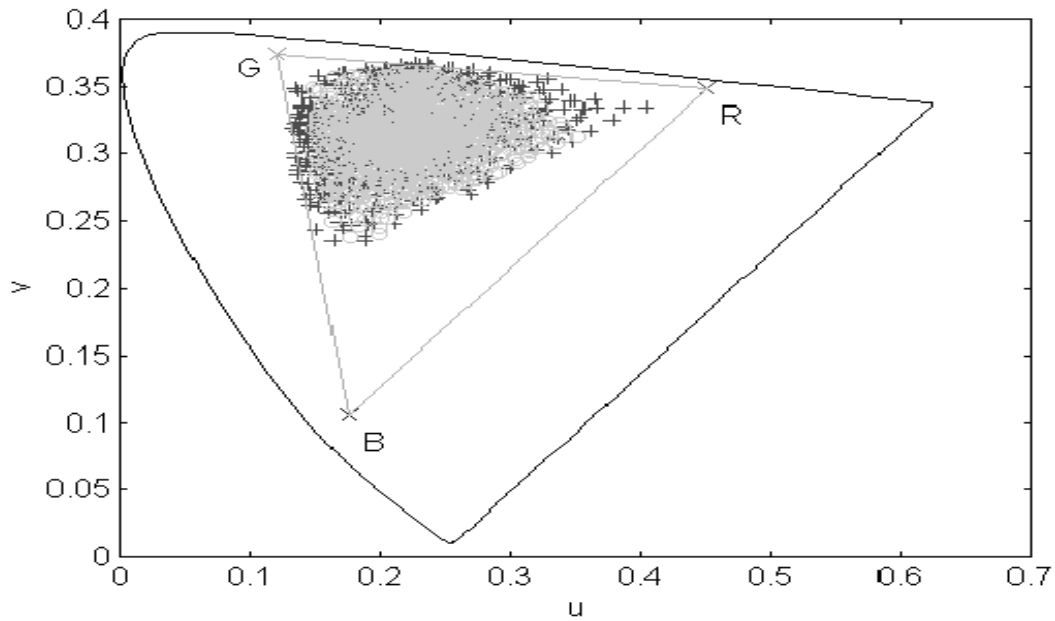
Obr. 1: Dosažené spektrální charakteristiky citlivostí snímací soustavy XYZ

Výsledky

Střední hodnota kolorimetrického zkreslení celého užitého souboru vzorkových barev $\bar{N}_{XYZ} = 4,30$ jnd.

Střední kvadratická odchylka kolorimetrického zkreslení celého užitého souboru vzorkových barev $\delta^2 N_{XYZ} = 2,26$.

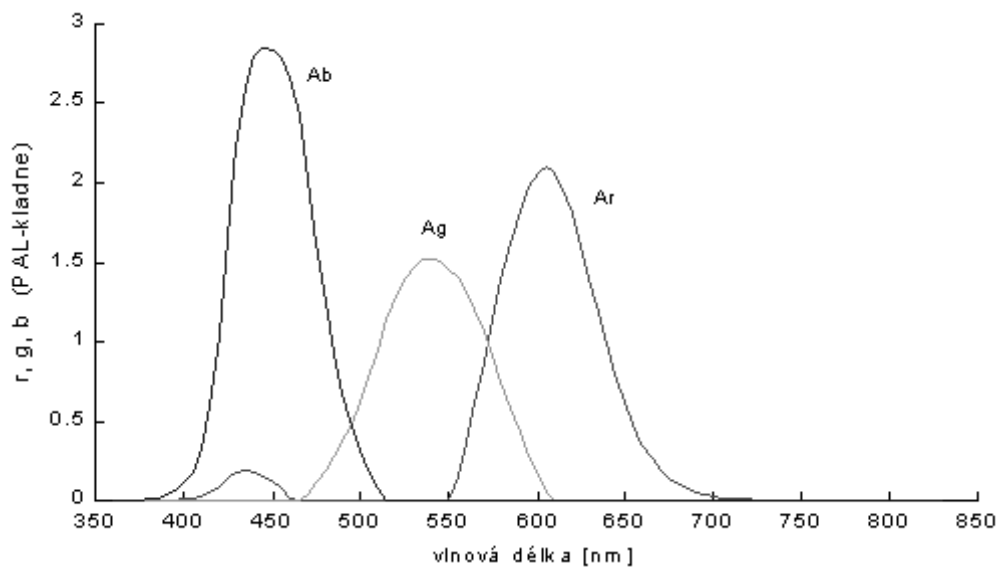
Dále je užitečné vynést souřadnice u,v originálních a reprodukováných barevných vzorků v rovnoměrném diagramu chromatičností CIEuv (obr. 2). Díky velkému počtu testovacích vzorků totiž můžeme hodnotit další vlastnosti soustavy, které ze střední hodnoty a kvadratické odchylky kolorimetrického zkreslení nelze vyčíst.



Obr.2: Výsledky testu kolorimetrického zkreslení snímací soustavy XYZ v diagramu CIEuv, vyneseno reprodukční trojúhelník $(RGB)_{PAL}$ (souřadnice originálních barev – tmavě, souřadnice reprodukováných barev –světle)

5. Kolorimetrické zkreslení hranolové světlořídící soustavy RGB

U hranolové světlořídící soustavy RGB uvažujeme: její spektrální charakteristiky citlivosti sledují ideální charakteristiky pouze v kladných větvích, záporné se neuvažují (jsou oříznuty). Průběhy těchto spektrálních citlivostí uvádí obr.3.



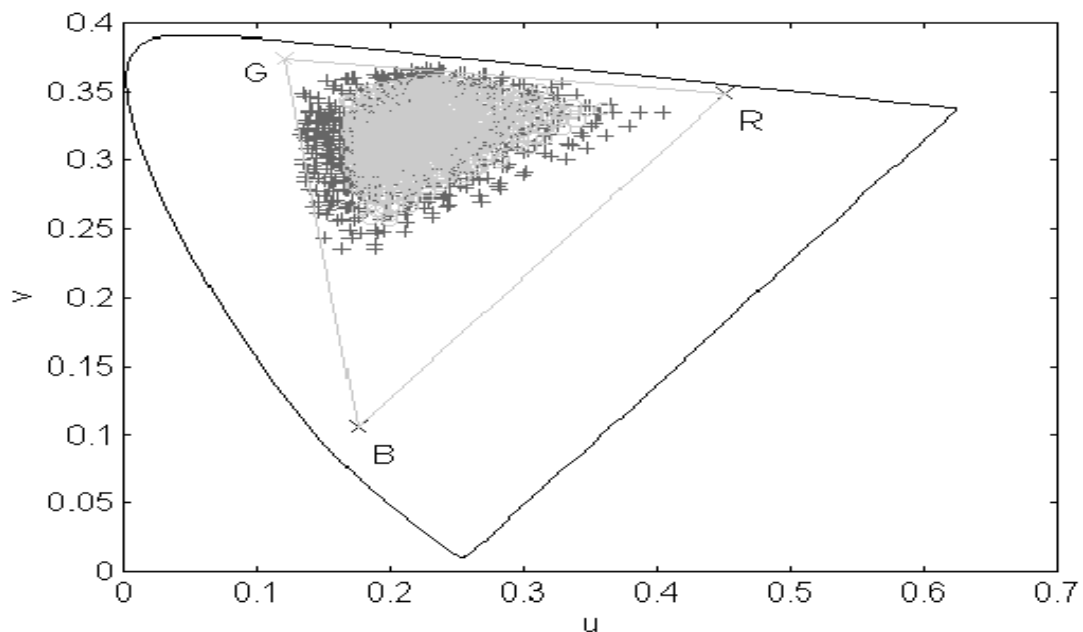
Obr. 3: Uvažované spektrální charakteristiky citlivostí snímací soustavy RGB

Výsledky

Střední hodnota kolorimetrického zkreslení celého užitého souboru vzorkových barev $\bar{N}_{RGB} = 9,58$ jnd.

Střední kvadratická odchylka kolorimetrického zkreslení celého užitého souboru vzorkových barev $\delta^2 N_{RGB} = 2,22$.

Dále jsem opět vynesl souřadnice u, v originálních a reprodukováných barevných vzorků (obr. 4). Tento výsledek je velice názorný pro srovnání se snímací soustavou XYZ .



Obr. 4: Výsledky testu kolorimetrického zkreslení snímací soustavy RGB v diagramu CIE_{uv} , vynesen reprodukční trojúhelník $(RGB)_{PAL}$ (souřadnice originálních barev – tmavě, souřadnice reprodukováných barev – světle)

6. Srovnání kolorimetrických zkreslení snímacích soustav XYZ a RGB

Aproximace spektrálních charakteristik citlivostí snímací soustavy RGB nebyly navrhovány, proto je třeba vzít v úvahu, že uvažovaný případ, kdy tyto citlivosti sledují ideální průběhy (samozřejmě jen v kladných větvích, záporné nelze opticky realizovat), je případem prakticky nedosažitelným. I přes tento předpoklad získáváme cenné výsledky.

Jen díky optickou cestou nerealizovatelným záporným větvím $\mathbf{Ar}(\lambda)$, $\mathbf{Ag}(\lambda)$, $\mathbf{Ab}(\lambda)$ dostáváme kolorimetrické zkreslení 9,58 jnd.

Kdyby se citlivosti snímací soustavy RGB , resp. jejich kladné větve aproximovaly s přesností dosaženou u snímací soustavy XYZ , výsledné \bar{N}_{RGB} by se v prvním přiblížení

zvětšilo právě o hodnotu $\bar{N}_{XYZ} = 4,30$ jnd, kolorimetrické zkreslení takové snímací soustavy *RGB* by pak bylo $\bar{N}_{RGB} = 9,58 + 4,30 = 13,88$ jnd. V tomto prvním přiblížení lze tedy konstatovat, že snímací soustava *XYZ* bude mít oproti snímací soustavě *RGB* kolorimetrické zkreslení vždy o 9,58 jnd nižší. Jenom proto, že spektrální charakteristiky citlivostí $\mathbf{A}_y(\lambda)$, $\mathbf{B}_x(\lambda)$, $\mathbf{C}_z(\lambda)$ snímací soustavy *XYZ* jsou pouze kladné.

Z diagramu CIEuv pro snímací soustavu *RGB* je názorně (díky velkému počtu vzorků) vidět, jak se reprodukční oblast zanedbáním záporných větví citlivostí $\mathbf{A}_r(\lambda)$, $\mathbf{A}_g(\lambda)$, $\mathbf{A}_b(\lambda)$ dále zmenší. Toto nastává i u snímací soustavy *XYZ*, ovšem v podstatně menší míře.

Kolorimetrická zkreslení jsem testoval třemi různými sadami vzorkových barev. Ověřil jsem si tak, že volbou testovacích vzorků (počtem a jejich spektrálními průběhy) můžeme výsledek kolorimetrického testu značně ovlivnit. Uvedl jsem proto uceleně pouze výsledky nejmasivnějšího testu, i když jsou tyto výsledky nejméně optimistické. Velice stručně uvedu výsledky ještě jednoho testu s podstatně nižším počtem testovacích vzorků. Předpoklady kladené na snímací soustavy jsou v tomto testu stejné jako v předešlém případě.

7. Test kolorimetrického zkreslení II

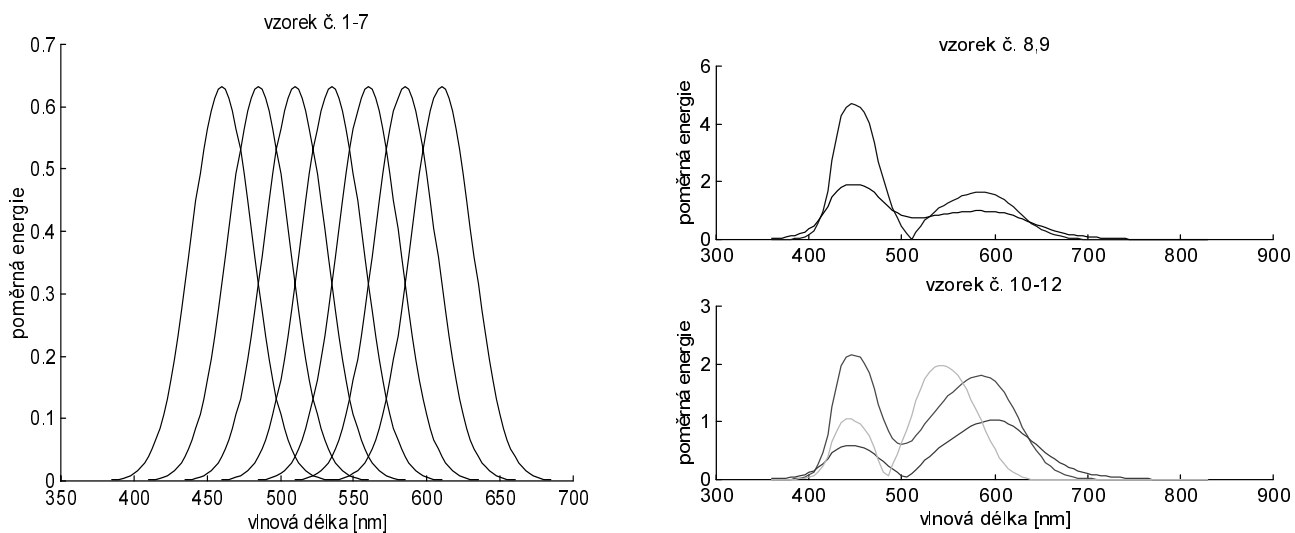
Nepředpokládáme-li významnou nelinearitu barevného zkreslení snímací soustavy (uvažováno po ploše diagramu CIEuv), můžeme počet testovacích vzorků výrazně snížit. Na základě takového předpokladu jsem generoval pouze 12 testovacích barevných vzorků v programu Matlab (obr. 5). Průběh jejich spektra je tedy syntetický. Testovací vzorky dostatečně pokrývají celou plochu diagramu barev CIEuv, asi polovina z nich dokonce leží vně reprodukčního trojúhelníku RGB_{PAL} (sytější barvy).

Výsledky

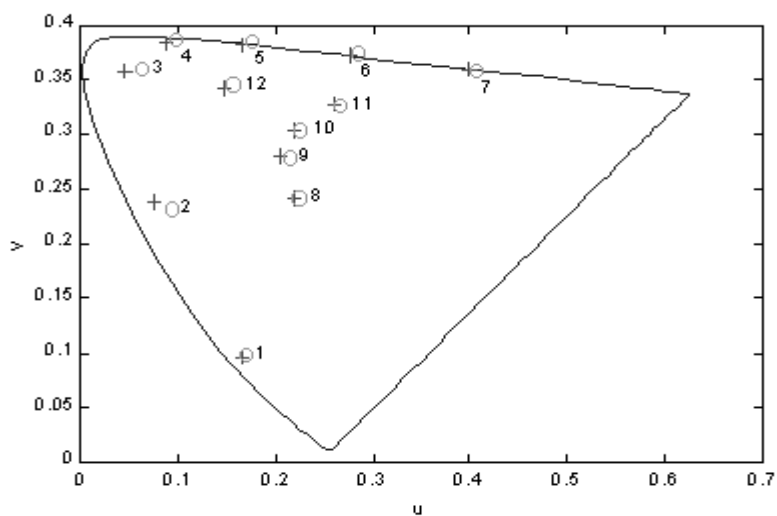
Střední hodnota kolorimetrického zkreslení celého užitého souboru vzorkových barev

- pro soustavu *XYZ*: $\bar{N}_{XYZ} = 2,87$ jnd,
- pro soustavu *RGB*: $\bar{N}_{RGB} = 13,69$ jnd.

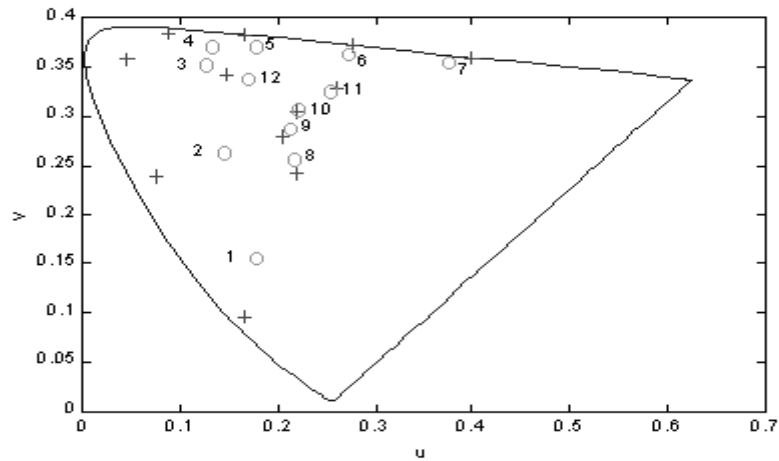
Dále jsou výsledky prezentovány výsledky formou rovnoměrného diagramu chromatičností CIEuv (obr. 6).



Obr. 5: Generované testovací barevné vzorky



Obr. 6a: Výsledky testu kolorimetrického zkreslení snímací soustavy XYZ
v diagramu CIEuv,
(souřadnice originálních barev – křížky, souřadnice reprodukováných barev – kolečka)



Obr. 6b: Výsledky testu kolorimetrického zkraslení snímací soustavy RGB v diagramu CIEuv, (souvřadnice originálních barev – křížky, souřadnice reprodukováných barev – kolečka)

8. Závěr

Druhý test kolorimetrického zkraslení nejen potvrdil, ale dokonce zesílil výsledek prvního, rozsáhlejšího testu. V druhém testu se rozdíl mezi kolorimetrickými zkrasleními daných snímací soustav ještě zvětšil, nová hranolová světlořídící soustava XYZ podle tohoto testu zkrasluje 4,7 krát méně, než konvenční světlořídící soustava RGB. Je ale třeba zdůraznit, že hodnotíme nemaskované průběhy charakteristik spektrálních citlivostí kanálů snímací soustav, přičemž u snímací soustavy RGB dále platí podmínka uvedená v odst. 5 a 6. Snímací soustava s ideální spektrální citlivostí s reálnou zobrazovací soustavou je teoretickým maximem, kterého lze v televizi dosáhnout: Nezkraslené reprodukce oblasti barev omezené obrazcem základních barev reprodukce [5]. Přiblížení se tomuto teoretickému maximu z hlediska hranolové světlořídící soustavy XYZ je dáno přesností aproximace ideálních charakteristik spektrálních citlivostí reálnými filtry.

Literatura

- [1] Košťál E., Kaiser J., Slavík J.: Hranolová světlořídící soustava pro televizní kamery, přihláška vynálezu č. PV 2000-1167, 30.3.2000.

- [2] Pazderák J. Kolorimetrie snímacích soustav barevné televize a elektronické kolorimetrické korekce, Edice ČS. TELEVIZE, řada II, svazek 16, Praha 1974, 150 s.
- [3] <http://cvision.ucsd.edu/index.html>
CIE Standards, Color spectra databases
- [4] <http://www.GWI.net/OSD>
program Synopsys
- [5] Novák Z. Optické soustavy snímacích zařízení, učební text pro postgraduální studium, ČVUT 1971