

ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЬОРОСПРИЙНЯТТЯ ТВ ЗОБРАЖЕНЬ: АДАПТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ СПРИЙНЯТТЯ

ГОФАЙЗЕН О.В., ПИЛЯВСЬКИЙ В.В.

Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова
ДП “Український науково-дослідний інститут радіо та телебачення”

TV IMAGE COLOUR APPEARANCE CHARACTERISTICS: PERCEPTION ADAPTIVE PROPERTIES

GOF AIZEN O.V., P ILYAVSKIY V.V.

Odessa national academy of telecommunications n.a. O.S. Popov
SE “Ukrainian scientific-research institute of radio and television”

Анотація. Приведений аналіз характеристик кольоросприйняття телевізійних зображень, заснований на використанні моделі цветовосприяття CIECAM02 і модифікації колірнього простору ($J'M'h'$), запропонованою Люо та ін. Дана оцінка адаптивних властивостей сприйняття з точки зору використання в телевізійних і інших відеозастосуваннях

Annotation. The analysis of television images colour appearance characteristics bases on the use of colour appearance model CIECAM02 and on colour space modification ($J'M'h'$) proposed by Luo and others is presented. An evaluation of adaptive properties of color perception from point of view of use in television and other video applications is given.

Вступ

Якість кольоровідтворення є одним з основних показників роботи ТБ і інших застосувань незалежно від використовуваних методів стискування, роздільної здатності і інших чинників. Воно визначається як характеристиками компонентів відеосистеми, так і умовами спостереження зображення на передавальній і приймальній сторонах.

До теперішнього часу ТБ системи будувалися і будуються виходячи з представлень класичної колориметрії, згідно якої неспотворене перенесення кольорів відповідає рівності координат деталей зображення системи CIE-31 X, Y, Z на передавальній і приймальній сторонах.

При цьому не враховується те, що умови спостереження зображення на приймальні і на передавальній сторонах, а також в проміжних точках системи виробництва і поствиробництва можуть істотно відрізнятися, і при цьому слід зважати на адаптаційні характеристики людського зору, що змінюються залежно від умов спостереження, і це знайшло віддзеркалення в останніх моделях цветовосприяття.

На сьогодні у світі створена наукова база, яка може бути покладена в основу створення ТБ систем і інших відеозастосувань нового рівня.

МКО побудована модель CIECAM02 [1], що характеризує властивості зорового сприйняття, що змінюються в широких межах з урахуванням досягнутого нині рівня знань, накопиченого сучасною колориметричною наукою.

Подальшим кроком стала побудова простору [2], що має більшу рівномірність, в якому можливо адекватніше по відношенню до усіх доступних даних [3] визначити відстань Евкліда. Використання нового простору для вирішення практичних завдань присвячені, зокрема, роботи [4–6], у яких пропонуються і досліджуються метрики для оцінки якості передачі кольорів для різних застосувань.

У телебаченні дослідження в цьому напрямі проводилися, починаючи з 1996 р. [7–9], спираючись на уявлення про адаптивний характер сприйняття кольору, і це знайшло віддзеркалення у відповідних вкладах України [10–24]. На основі цих вкладів в Дослідній комісії 6 Секторів радіозв'язку Міжнародного союзу електров'язку (ГИК 6 МСЭ-Р) розпочались досліджень, присвячених проблемі побудови адаптивних систем майбутнього і систем оцінки якості відтворення в телебаченні, одним з

результатів яких стало прийняття Рекомендацій ITU - R BT.1691 і ITU - R BT.1692 [25,26]. У період до 2002 р. в основу досліджень було покладена модель цветовосприяття CIECAM97s [27], і на основі цієї моделі були отримані перші оцінки характеристик сприйняття кольорових ТБ зображень. З прийняттям моделі CIECAM02 в 2002 р. дослідження були продовжені і були отримані подібні оцінки на основі використання цієї моделі [28–32].

Із створенням нового колірному простору [2], враховуючи, що з використання цього простору стає реальним, практичне використання адаптивної колориметрії для побудови адаптивних телевізійних систем майбутнього і для нових прогресивних методів оцінки якості перенесення кольорів, представляється актуальним дати відповідні оцінки, що і склало завдання справжньої роботи.

Оцінка зміни властивостей кольоросприйняття в просторі CIECAM02 із зміною умов спостереження

Оцінка властивостей цветовосприяття дається тут для монохроматичних кольорів у вигляді оцінки зміни положення точок лінії спектральних і пурпурних кольорів із зміною яскравості стимулу і яскравості адаптації в колірному просторі моделі кольоросприйняття CIECAM02. Ця модель представлена в таблиці 1 відповідно до [1] і [6] у вигляді формул, що описують пряме і зворотне перетворення координат X, Y, Z простору CIE 1931 р. і простору CIECAM02. Вхідні і вихідні параметри моделі цветовосприяття CIECAM02 проілюстровані на малюнку 1.

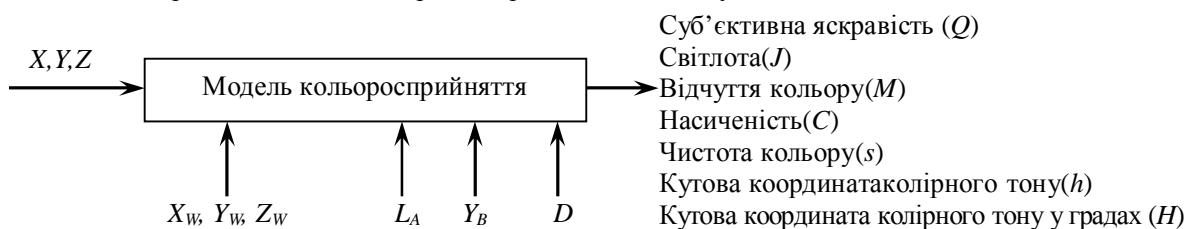


Рисунок 1 – Вхідні та вихідні параметри моделі кольоросприйняття CIECAM02

Детальніше моделі кольоросприйняття CIECAM02 представлена в таблиці 1

Таблиця 1 – Пряме та зворотне перетворення XYZ ↔ CIECAM02

ПРЯМЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ XYZ ⇒ CIECAM02	
<u>Вхідні дані</u>	
X, Y, Z	– координати кольорового стимулу в системі CIE-1931;
X_w, Y_w, Z_w	– колірні координати опорного білого кольору зображення сцени в системі CIE 1931;
$L_{SW}, \text{кД} \cdot \text{м}^{-2}$	– абсолютна яскравість опорного білого оточення;
$L_{DW}, \text{кД} \cdot \text{м}^{-2}$	– абсолютна яскравість зображення сцени на екрані відтворюючого пристрою;
$L_A, \text{кД} \cdot \text{м}^{-2}$	– абсолютна яскравість адаптації спостерігача до оточення. Якщо даних про яскравість адаптації немає, її значення набувають рівним: $L_A = 0,2 \cdot L_{DW};$
c	– параметр, що характеризує вплив оточення;
N_C	– параметр, що характеризує хроматичну індукцію оточення;
F	– параметр, що характеризує міру адаптації спостерігача;
Y_B	– відносна яскравість фону. Якщо даних про яскравість фону немає, її значення набувають рівним: $Y_B = 0,2 \cdot Y_w.$
Якщо значення параметрів c , N_C і F невідомі, їх можна визначити за допомогою таблиці:	

Продовження таблиці 1

Параметри, залежні від оточення

Тип оточення	c	N_C	F
Середнє оточення (поліграфічний матеріал)	0,69	1,0	1,0
Тьмяне оточення (ТВ екрани)	0,59	0,9	0,9
Темне оточення (Проекційні екрани)	0,525	0,8	0,8

Тип оточення можна визначити за допомогою наступного співвідношення:

$$S_R = L_{sw} / L_{DW}$$

Якщо $S_R = 0$, вважають, що це – темне оточення, якщо $S_R < 0,2$, це – тьмяне оточення, і якщо $S_R \geq 0,2$, це – середнє оточення.

Модель адаптації

Лінійна модель адаптації, заснована на перетворенні Фон Кріса, :

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = M_{CAT02} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}; \quad M_{CAT02} = \begin{bmatrix} 0,7328 & 0,4296 & -0,1624 \\ -0,7036 & 1,6975 & 0,0061 \\ 0,0030 & 0,0136 & 0,9834 \end{bmatrix}.$$

Міра адаптації спостерігача :

$$D = F \cdot \left(1 - \frac{1}{3,6} \cdot e^{-\frac{L_A + 42}{92}} \right).$$

Адаптовані трохстимульные відгуки:

$$R_C = [Y_W D / R_W + (1 - D)] \cdot R;$$

$$G_C = [Y_W D / G_W + (1 - D)] \cdot G;$$

$$B_C = [Y_W D / B_W + (1 - D)] \cdot B.$$

Коефіцієнти, залежні від умов спостереження

$$k = 1 / (5 \cdot L_A + 1).$$

Коефіцієнти, залежні від рівня яскравості, :

$$F_L = 0,2 \cdot k^4 \cdot (5L_A) + 0,1 \cdot (1 - k^4)^2 \cdot (5L_A)^{1/3}; \quad n = Y_B / Y_W.$$

Коефіцієнт індукції фону :

$$N_{bb} = N_{cb} = 0,725 \cdot (1/n)^{0,2}.$$

Коефіцієнт нелінійного перетворення :

$$z = 1,48 + \sqrt{n}.$$

Продовження таблиці 1

<p><u>Перетворення значень відгуків у форму Ханта-Пойнтера-Эстевеза</u></p> $\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{\text{HPE}} \cdot \mathbf{M}_{\text{CAT02}}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} R_C \\ G_C \\ B_C \end{bmatrix};$ $\mathbf{M}_{\text{HPE}} = \begin{bmatrix} 0,38971 & 0,68898 & -0,07868 \\ -0,22981 & 1,18340 & 0,04641 \\ 0,00000 & 0,00000 & 1,00000 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{M}_{\text{CAT02}}^{-1} = \begin{bmatrix} 1,096124 & -0,278869 & 1,182745 \\ 0,454369 & 0,473533 & 0,072098 \\ -0,009628 & -0,005698 & 1,015326 \end{bmatrix}.$					
<p><u>Постадаптаційне нелінійне стиснення відгуків</u></p> $R'_A = \frac{400 \cdot (F_L \cdot R'/100)^{0,42}}{27,13 + 400 \cdot (F_L \cdot R'/100)^{0,42}} + 0,1;$ $G'_A = \frac{400 \cdot (F_L \cdot G'/100)^{0,42}}{27,13 + 400 \cdot (F_L \cdot G'/100)^{0,42}} + 0,1;$ $B'_A = \frac{400 \cdot (F_L \cdot B'/100)^{0,42}}{27,13 + 400 \cdot (F_L \cdot B'/100)^{0,42}} + 0,1.$					
<p><u>Опонентні осі</u></p> $a = R'_A - 12G'_A/11 + B'_A/11; \quad b = (1/9) \cdot (R'_A + G'_A - 2B'_A).$					
<p><u>Колірний тон</u></p> $h = \tan^{-1}(b/a); h_r = h \cdot 180/p;$ $h = \begin{cases} h_r & \text{якщо } a > 0 \ \& \ b > 0; \\ h_r + 180 & \text{якщо } a < 0; \\ h_r + 360 & \text{якщо } a > 0 \ \& \ b < 0. \end{cases}$					
<p>Показник ексцентриситету</p> $e_i = \frac{1}{4} \cdot \left[\cos \left(h \cdot \frac{p}{180} + 2 \right) + 3,8 \right].$					
<p>Показник кольорого тону в градах H ; може бути розрахований шляхом інтерполяції по формулі</p> $H = H_i + \frac{100 \cdot (h' - h_i)/e_i}{(h' - h_i)/e_i + (h_{i+1} - h')/e_{i+1}}.$					
<p>Якщо $h < h_1$, то $h' = h + 360$, у всіх інших випадках $h' = h$.</p>					
<p>Параметри опорних кольорів системи</p>					
	Червоний	Жовтий	Зелений	Синій	Червоний
i	1	2	3	4	5
h_i	20,14	90,00	164,25	237,53	380,14
e_i	0,8	0,7	1,0	1,2	0,8
H_i	0,0	100,0	200,0	300,0	400,0

Продовження таблиці 1

<p><u>Світлота</u> Ахроматичний відгук:</p> $A = 2R'_A + G'_A - 2B'_A$ <p>Світлота:</p> $J = 100 \cdot (A/A_w)^{c \cdot z}$ <p>Суб'єктивна яскравість:</p> $Q = (4/c) \cdot \sqrt{J/100} \cdot (A_w + 4) \cdot F_L^{0,25}$
<p><u>Насиченість, відчуття кольору і чистота кольору</u> Насиченість:</p> $C = t^{0,9} \cdot \sqrt{J/100} \cdot (1,64 - 0,29^n)^{0,73}; \quad t = \frac{(50000/13) \cdot N_C \cdot N_{cb} \cdot e_t \cdot \sqrt{a^2 + b^2}}{R'_A + G'_A + (21/20) \cdot B'_A};$ <p>Відчуття колірності :</p> $M = C \cdot F_L^{0,25};$ <p>Чистота кольору :</p> $s = 100 \cdot \sqrt{M/Q}.$
<p>ЗВОРОТНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ CIECAM02 \Rightarrow XYZ</p>
<p><u>Параметри, залежні від умов спостереження і ахроматичний відгук для опорного білого</u> c, N_C, F – з таблиці параметрів, залежних від умов спостереження; A_w – з формул для прямого перетворення</p>
<p><u>Суб'єктивна яскравість, світлота і насиченість кольору</u> Якщо у вхідних даних задано суб'єктивну яскравість Q, знаходимо світлоту J :</p> $J = 6,25 \cdot \left[\frac{c \cdot Q}{(A_w + 4) \cdot F_L^{0,25}} \right]^2.$ <p>Якщо в вхідних даних задано відчутність кольору M, знаходимо насиченість \tilde{N} :</p> $C = M / F_L^{0,25}.$ <p>Якщо в вхідних даних задано світлота J, знаходимо суб'єктивну яскравість Q :</p> $Q = \frac{4}{c} \cdot \sqrt{J/100} \cdot (A_w + 4) \cdot F_L^{0,25}.$ <p>Якщо в вхідних даних задано чистоту кольору S, насиченість можна визначити як:</p> $C = \left(\frac{s}{100} \right)^2 \cdot \frac{Q}{F_L^{0,25}}.$
<p><u>Показники колірного тону</u> Якщо відомий показник колірного тону в градах, показник колірного тону в градусах обчислюють з використанням даних, приведених в таблиці параметрів опорних кольорів моделі, по формулі:</p> $h' = \frac{(H - H_i) \cdot (e_{i+1} \cdot h_i - e_i \cdot h_{i+1}) - 100 \cdot e_{i+1} \cdot h_i}{(H - H_i) \cdot (e_{i+1} - e_i) - 100 \cdot e_{i+1}},$ <p>де $h = h' - 360$, якщо $h' > 360$, в іншому випадку $h = h'$;</p> $t = \left[\frac{C}{\sqrt{J/100} \cdot (1,64 - 0,29^n)^{0,73}} \right]^{0,9};$

Продовження таблиці 1

Показник ексцентриситету:
$e_t = \frac{1}{4} \cdot [\cos(h \cdot p/180 + 2) + 3,8].$
<u>Коефіцієнти, залежні від умов спостереження</u>
$k, F_L, n, N_{bb}, N_{cb}, z$ – по формулах прямого перетворення.
<u>Ахроматичний відгук</u>
$A = A_w \cdot (J/100)^{1/(c-z)}.$
<u>Опонентні осі</u>
Допоміжні параметри:
$h_r = h \cdot p/180;$
$p_1 = (50000/13) \cdot N_c N_{cb} e_t / t;$ $p_2 = (A/N_{bb}) + 0,305;$ $p_3 = 21/20;$
якщо $\sin(h_r) \geq \cos(h_r)$, то $p_4 = p_1 / \sin(h_r);$
якщо $\sin(h_r) < \cos(h_r)$, то $p_5 = p_1 / \cos(h_r).$
Опонентні осі :
якщо $\sin(h_r) \geq \cos(h_r)$, то:
$b = \frac{p_2 \cdot (2 + p_3) \cdot (460/1403)}{p_4 + (2 + p_3) \cdot (220/1403) \cdot [\cos(h_r)/\sin(h_r)] - (27/1403) + p_3 \cdot (6300/1403)};$
$a = b \cdot [\cos(h_r)/\sin(h_r)];$
якщо $\sin(h_r) < \cos(h_r)$, то:
$a = \frac{p_2 \cdot (2 + p_3) \cdot (460/1403)}{p_5 + (2 + p_3) \cdot (220/1403) - [(27/1403) + p_3 \cdot (6300/1403)] \cdot (\sin(h_r)/\cos(h_r))};$
$b = a \cdot [\sin(h_r)/\cos(h_r)].$
<u>Відгуки колбочкового апарату :</u>
$R'_A = \frac{460}{1403} \cdot p_2 + \frac{451}{1403} \cdot a + \frac{288}{1403} \cdot b;$
$G'_A = \frac{460}{1403} \cdot p_2 - \frac{891}{1403} \cdot a - \frac{261}{1403} \cdot b;$
$B'_A = \frac{460}{1403} \cdot p_2 - \frac{220}{1403} \cdot a - \frac{6300}{1403} \cdot b;$
$R' = \text{sign}(R'_A - 0,1) \cdot \frac{100}{F_L} \cdot \left(\frac{27,13 \cdot R'_A - 0,1 }{400 - R'_A - 0,1 } \right)^{\frac{1}{0,42}};$
$G' = \text{sign}(G'_A - 0,1) \cdot \frac{100}{F_L} \cdot \left(\frac{27,13 \cdot G'_A - 0,1 }{400 - G'_A - 0,1 } \right)^{\frac{1}{0,42}};$

Кінець таблиці 1

$$B' = \text{sign}(G'_A - 0,1) \cdot \frac{100}{F_L} \cdot \left(\frac{27,13 \cdot |B'_A - 0,1|}{400 - |B'_A - 0,1|} \right)^{\frac{1}{0,42}};$$

$$\begin{bmatrix} R_C \\ G_C \\ B_C \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{\text{CAT02}} \cdot \mathbf{M}_{\text{HPE}}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{M}_{\text{HPE}}^{-1} = \begin{bmatrix} 1,910197 & -1,112124 & 0,201908 \\ 0,370950 & 0,629054 & -0,000008 \\ 0,000000 & 0,000000 & 1,000000 \end{bmatrix};$$

$$R = \frac{R_C}{(Y_w D / R_w + 1 - D)};$$

$$G = \frac{G_C}{(Y_w D / G_w + 1 - D)};$$

$$B = \frac{B_C}{(Y_w D / B_w + 1 - D)}.$$

Колірні координати стимулу в системі СІЕ 1931:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{\text{CAT02}}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}.$$

У системі СІЕСАМ02 колірність характеризується трьома атрибутами: насиченістю C , відчуттям кольору M і чистотою кольору s . Ці атрибути разом зі світлотою J і кутовою координатою кольорного тону h можуть утворювати три колірні простори J, a_C, b_C , J, a_M, b_M і J, a_s, b_s , де

$$\begin{aligned} a_C &= C \cdot \cos(h) & a_M &= M \cdot \cos(h) & a_s &= s \cdot \cos(h) \\ b_C &= C \cdot \sin(h) & b_M &= M \cdot \sin(h) & b_s &= s \cdot \sin(h) \end{aligned}$$

На малюнках 2, 3, 4 представлені отримані шляхом моделювання в середовищі MATLAB реалізації діаграми колірності СІЕСАМ02, представлені на площині координат a_M, b_M для рівнів яскравості адаптації L_A , рівних 20, 100 і 200 кд/м², відповідних максимальній яскравості опорного білого $L_w = 5L_A$, рівних 100, 500 і 1000 кд/м². З малюнків видно, що зміна рівня яскравості адаптації від 20 cd/m^2 до 200 cd/m^2 призводить до значних змін відчуття колірності, що зростають із збільшенням відносної яскравості стимулу

Оцінка зміни властивостей кольоросприйняття в модифікованому просторі ($J'M'h'$) із зміною яскравості адаптації і оточення

Колориметричні оцінки, засновані на використанні системи СІЕСАМ02, зазвичай представляють в просторі J, C, h або Q, M, h . Як показано в роботі [2], чіткіше прогнозування кольоросприйняття досягається у разі використання простору J, M, h .

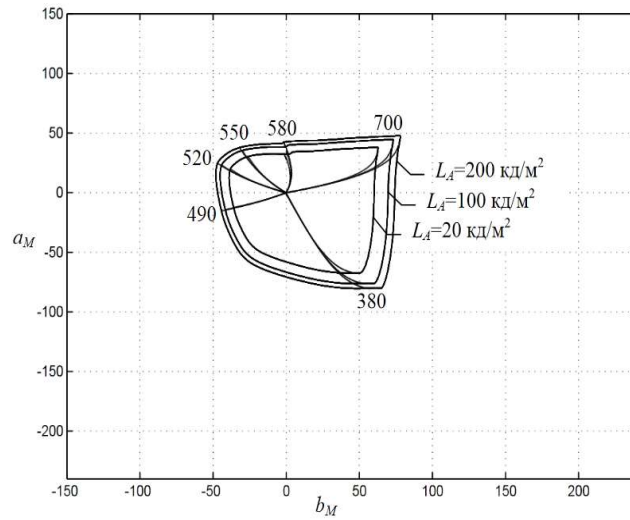


Рисунок 2 – Диаграма колірності SIESCAM02 (a_M, b_M) $Y_w=100, Y=1$

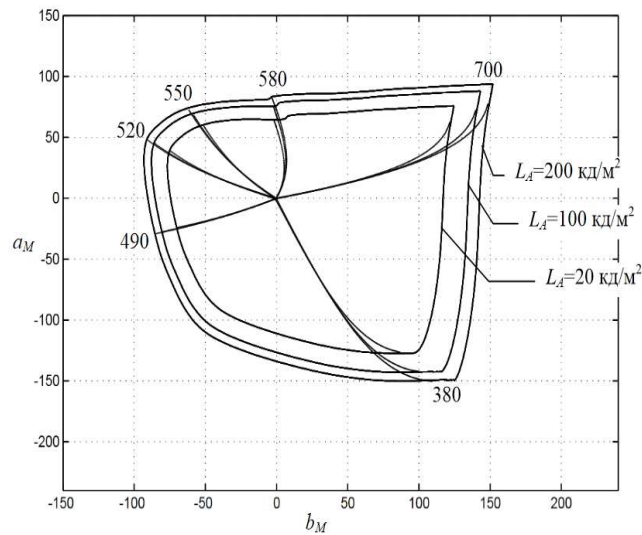


Рисунок 3 – Диаграма колірності SIESCAM02 (a_M, b_M) $Y_w=100, Y=10$

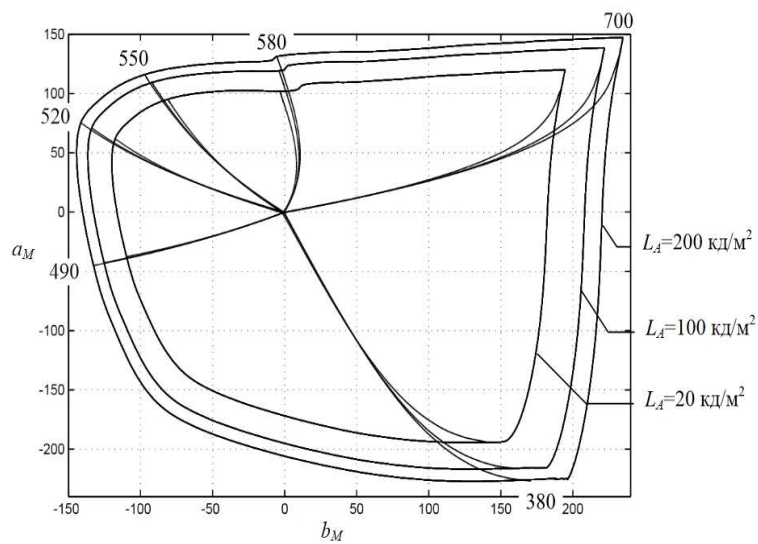


Рисунок 4 – Диаграма колірності SIESCAM02 (a_M, b_M) $Y_w=100, Y=50$

У роботі [2] запропоновані наступні модифікації колірного простору для великих (CAM02 - LCD), малих (CAM02 - SCD) або комбінованих (CAM02 - UCS) колірних відмінностей:

$$J' = \frac{(1+100c_1)J}{1+c_1J}; \quad M' = (1/c_2)\ln(1+c_2M);$$

$$a'_M = M' \cos(h'); \quad b'_M = M' \sin(h'); \quad h' = h.$$

У модифікованому просторі $J'M'h'$ відстань Евкліда визначається як

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta J'/K_L)^2 + (\Delta a'_M)^2 + (\Delta b'_M)^2}$$

де

$$\Delta J' = J'_1 - J'_2; \quad \Delta a' = a'_{M1} - a'_{M2}; \quad \Delta b' = b'_{M1} - b'_{M2},$$

індекси 1 і 2 відносяться до двох порівнюваних кольорів.

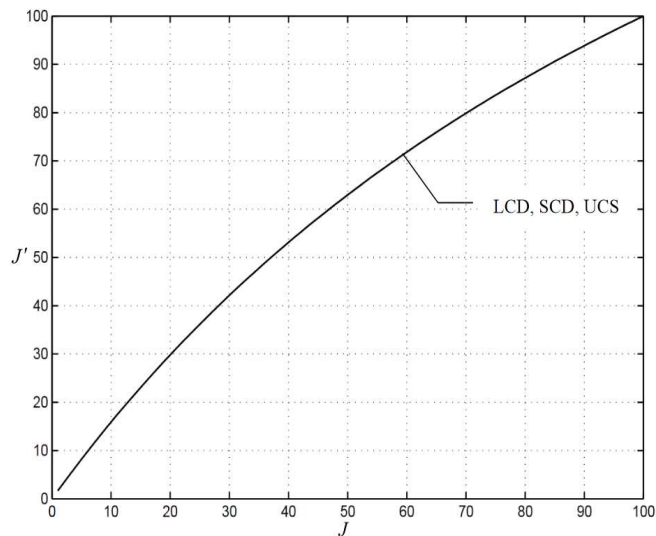
Коефіцієнти для кожної модифікації колірному простору представлені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Коефіцієнти c_1, c_2, K_L

Коефіцієнти	Модифікація колірному простору		
	CAM02-LCD	CAM02-SCD	CAM02-UCS
K_L	0,77	1,24	1,00
c_1	0,007	0,007	0,007
c_2	0,0053	0,0363	0,0228

Зв'язок координат J і J' , M і M' представлена на малюнках 5 і 6.

Як впливає з опублікованих результатів досліджень, оцінки, що отримуються з використанням цих модифікацій, якнайкраще узгоджуються з усіма доступними даними про цветовосприяття і можуть розглядатися як основа для подальших досліджень, спрямованих на прогрес телевізійних і споріднених ним відеосистем і на прогрес моделей кольоросприйняття для їх використання як частини систем оцінки якості зображення, зокрема, оцінки колориметричної якості.



Рисunek 5 Зображено залежність світлоті при переході від CIECAM02 (J) до CAM02-UCS (J')

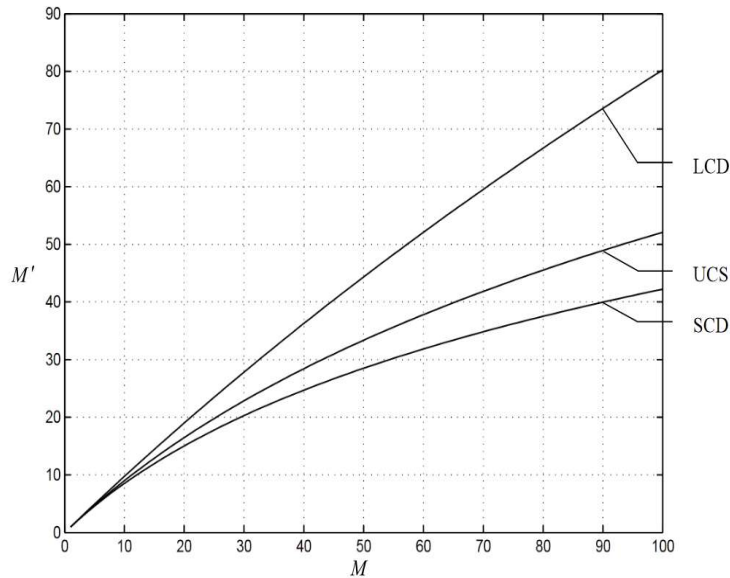


Рисунок 6 Взаємозв'язок оцінок відчуття колірності при переході від СІЕСАМ02 (M) до САМ2-UCS (M')

Слід зазначити необхідність подальших колориметричних досліджень, пов'язаних з телевізійною специфікою з урахуванням характеристик зйомки і відтворення, що впливають на якість, умов зйомки і відтворення сцен та ін.

Вплив яскравості адаптації. На малюнках 7–9 представлені реалізації діаграми колірності в просторі САМ02 - UCS на площині координат (a'_M, b'_M) . Малюнки демонструють залежність характеристик кольоросприйняття від яскравості адаптації L_A і від яскравості стимулу Y .

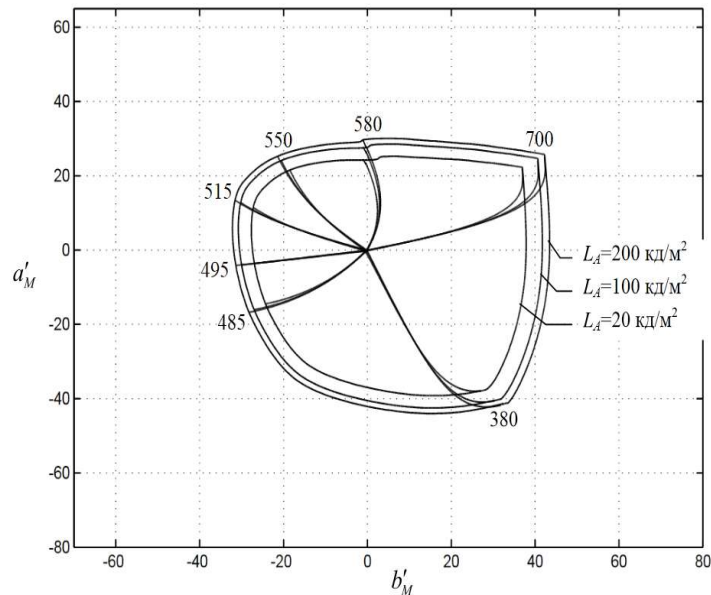


Рисунок 7 – Діаграма колірності САМ02-UCS (a'_M, b'_M) для $Y_n=100, Y=1$

З малюнків видно, що:

- зміна яскравості адаптації L_A призводить до відчутних змін сприйманої колірності, а саме в основному відчуття колірності M' і певною мірою колірного тону h' в просторі САМ02 - UCS, проте, меншим, ніж зміна безпосередньо колірності M і колірного тону h в просторі системи СІЕСАМ02;

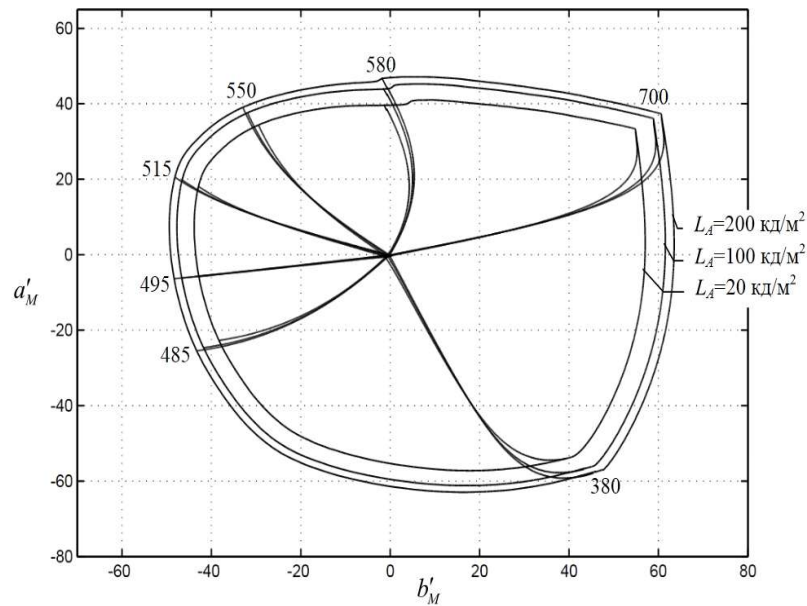


Рисунок 8 – Діаграма колірності CAM02-UCS (a'_M, b'_M) для $Y_n=100, Y=10$

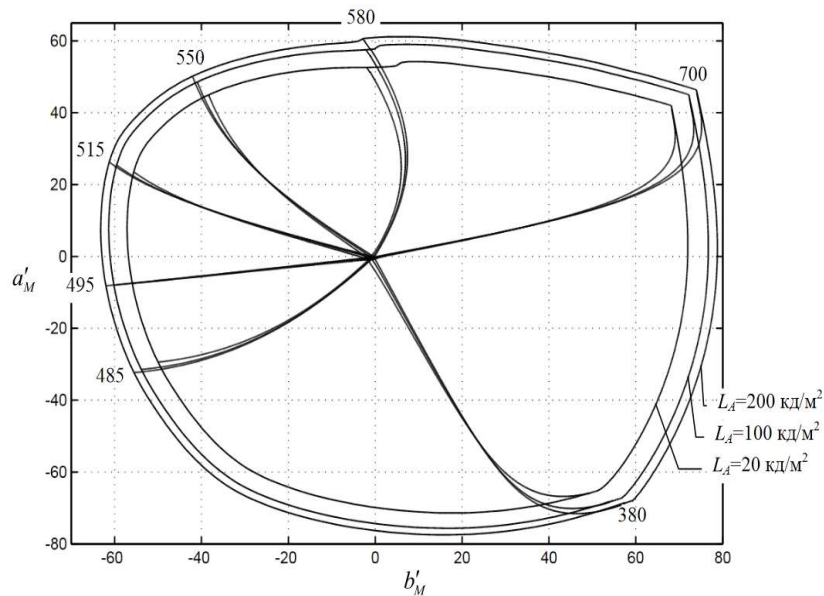


Рисунок 9 – Діаграма колірності CAM02-UCS (a'_M, b'_M) для $Y_n=100, Y=50$

- із збільшенням відносної яскравості стимулу Y залежність змін колірності від яскравості адаптації носить стабільний характер і мало змінюється із зміною L_A , причому ця залежність нелінійна.

Спільний вплив оточення і яскравості адаптації. На малюнках 10–19 представлені проекції діаграми колірності в просторі CAM02 - UCS на площину координат (a'_M, b'_M). Малюнки демонструють зміну кольоросприйняття залежно від оточення (темне, тьмяне, середнє) і яскравості адаптації L_A для заданих рівнів відносної яскравості стимулу Y .

Як випливає з малюнків, зміна умов оточення істотно впливає на кольоросприйняття, як це видно із залежності проекції діаграми колірності на площину координат a'_M, b'_M , і цей вплив проявляється найбільшою мірою при великих рівнях відносної яскравості стимулу, причому має місце зміна як відчуття колірності M' , так і сприйманого колірного тону h' .

Ці зміни кольоросприйняття можуть бути критичні для відео застосувань, в яких умови спостереження істотно відрізняються на передавальній і приймальній сторонах, що призводить до порушення перенесення кольорів.

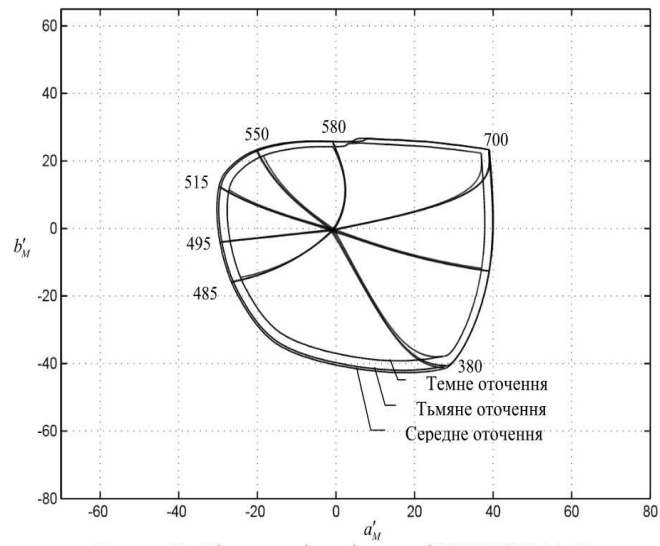


Рисунок 10 – Діаграма колірності в системі SAM02-UCS (a'_M, b'_M),
 $L_A = 20; Y = 1; Y_W = 100$

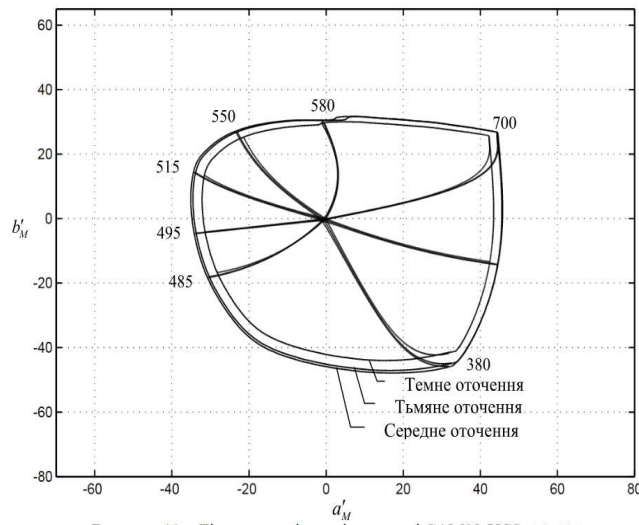


Рисунок 11 – Діаграма колірності в системі SAM02-UCS (a'_M, b'_M),
 $L_A = 200; Y = 1; Y_W = 100$

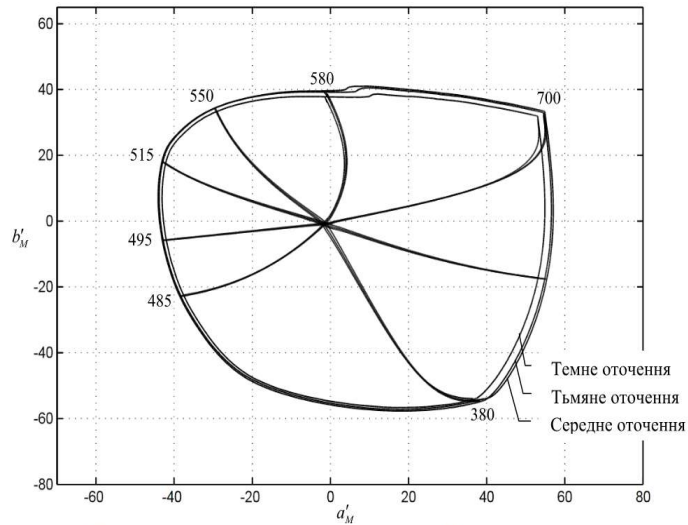


Рисунок 12 – Діаграма колірності в системі SAM02-UCS (a'_M, b'_M),
 $L_A = 20; Y = 10; Y_W = 100$

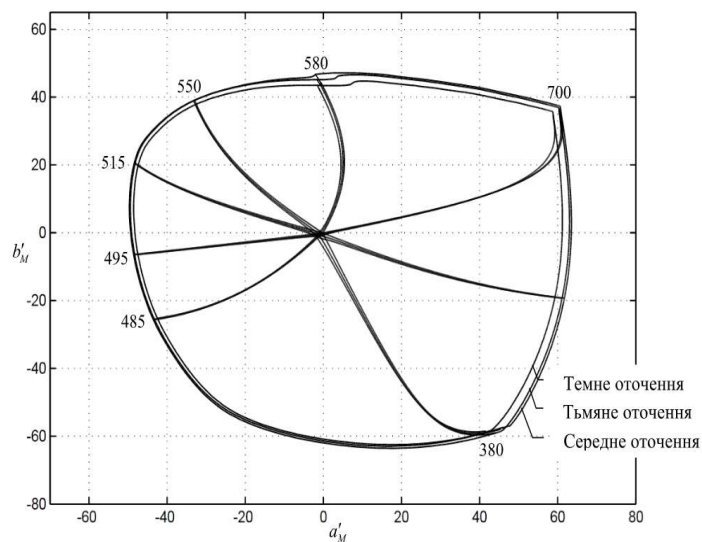


Рисунок 13 – Діаграма колірності в системі SAM02-UCS (a'_M, b'_M),

$$L_A = 200; Y = 10; Y_w = 100$$

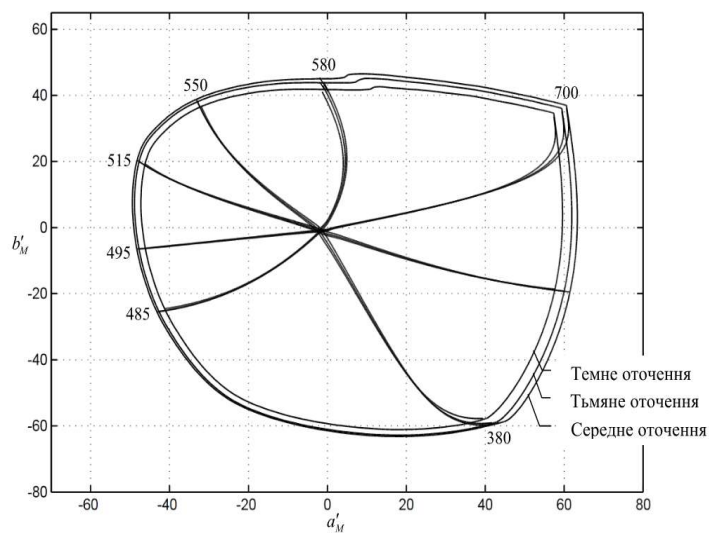


Рисунок 14 – Діаграма колірності в системі SAM02-UCS (a'_M, b'_M),

$$L_A = 20; Y = 20; Y_w = 100$$

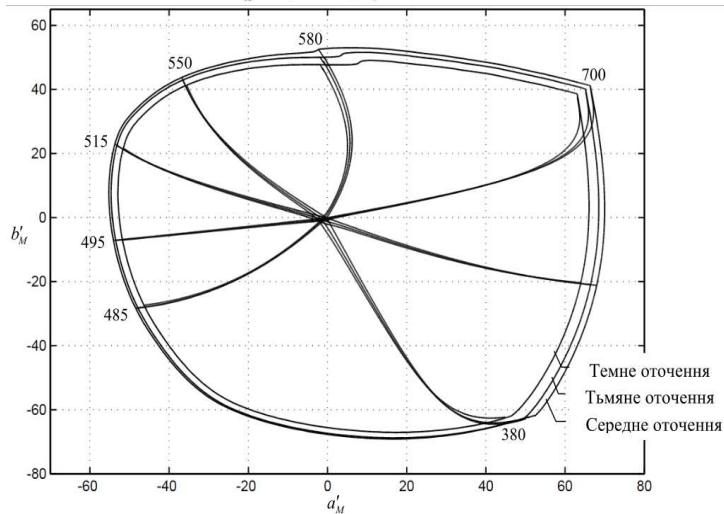


Рисунок 15 – Діаграма колірності в системі SAM02-UCS (a'_M, b'_M),

$$L_A = 200; Y = 20; Y_w = 100$$

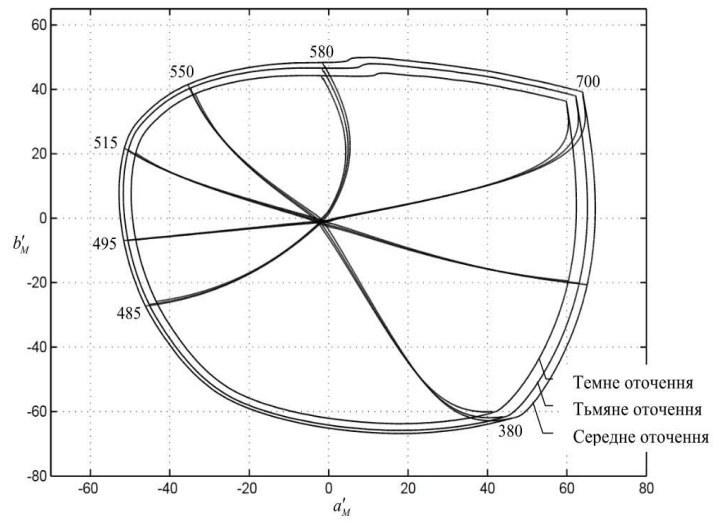


Рисунок 16 – Діаграма колірності в системі CAM02-UCS (a'_M, b'_M),

$$L_A = 20; Y = 30; Y_W = 100$$

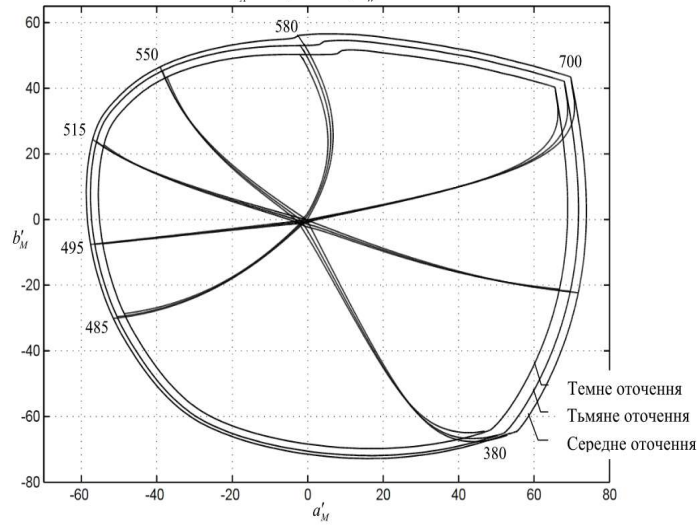


Рисунок 17 – Діаграма колірності в системі CAM02-UCS (a'_M, b'_M),

$$L_A = 200; Y = 30; Y_W = 100$$

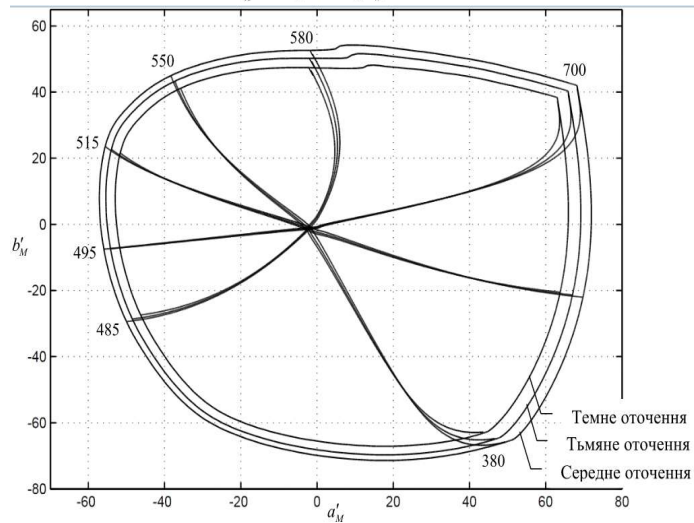


Рисунок 18 – Діаграма колірності в системі CAM02-UCS (a'_M, b'_M),

$$L_A = 20; Y = 50; Y_W = 100$$

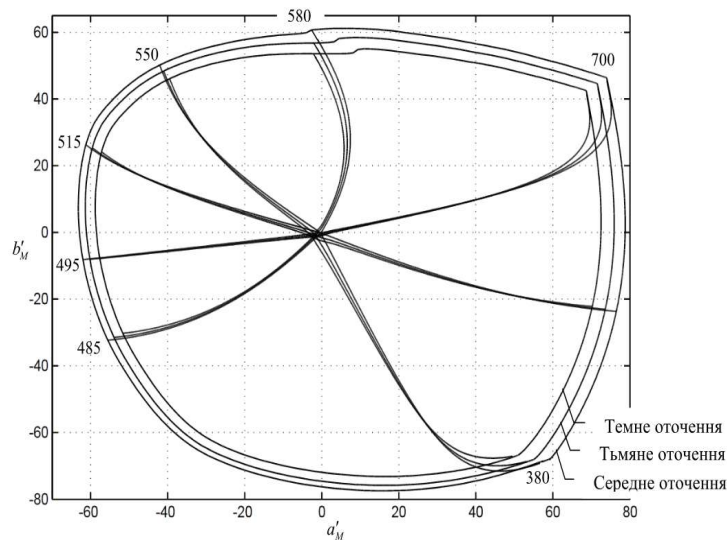


Рисунок 19 – Діаграма кольорності в системі CAM02-UCS (a'_M, b'_M),
 $L_A = 200; Y = 50; Y_W = 100$

Загальна оцінка зміни кольоросприйняття

Повнішу кількісну оцінку можливих змін кольоросприйняття із зміною яскравості адаптації і умов спостереження можна дати, оцінивши зміну координат кольорності в просторі CAM02 - UCS як відстань ΔE між точками на площині координат a'_M, b'_M для різних поєднань умов спостереження на передавальній і на приймальній сторонах.

Приклади кількісної оцінки значень ΔE наведені в таблицях 1–4.

Таблиця 3 - Координати кольору точок діаграми кольорності для $Y=10$

Оточення	$L_A, \text{кд/м}^2$	$I, \text{нм}$								
		380			485			495		
		a'_M	b'_M	J'	a'_M	b'_M	J'	a'_M	b'_M	J'
середнє	20	39,30	-53,99	38,21	-38,27	-22,71	34,89	-42,77	-5,74	35,68
	200	45,48	-57,84	36,39	-43,25	-25,45	35,04	-48,30	-6,37	35,86
тьмяне	20	38,28	-54,65	45,95	-38,48	-22,91	41,62	-43,01	-5,85	42,36
	200	43,94	-59,00	44,58	-43,46	-25,68	41,77	-48,55	-6,50	42,55
темне	20	36,46	-53,88	51,64	-37,55	-22,43	46,53	-41,98	-5,78	47,22
	200	41,63	-58,52	50,62	-42,46	-25,18	46,69	-47,44	-6,44	47,41

Оточення	$L_A, \text{кд/м}^2$	$I, \text{нм}$								
		515			550			580		
		a'_M	b'_M	J'	a'_M	b'_M	J'	a'_M	b'_M	J'
середнє	20	-42,87	18,09	36,54	-29,41	34,25	38,29	-0,79	38,66	40,61
	200	-48,13	20,54	36,76	-32,89	38,91	38,55	-0,67	44,37	40,90
тьмяне	20	-43,12	18,07	43,19	-29,64	34,19	44,87	-0,99	38,42	47,09
	200	-48,41	20,50	43,41	-33,17	38,81	45,12	-0,91	44,04	47,36
темне	20	-42,16	17,55	48,00	-29,04	33,19	49,60	-1,15	37,11	51,70
	200	-47,39	19,91	48,22	-32,58	37,70	49,84	-1,12	42,57	51,96

Кінець таблиці 3

Оточення	L_A , кд/м ²	I , нм					
		700			W		
		a'_M	b'_M	J'	a'_M	b'_M	J'
середнє	20	54,87	32,62	44,89	-1,00	-0,59	1,18
	200	60,65	36,61	45,26	-0,21	-0,12	0,24
тьмяне	20	54,55	32,15	51,10	-1,52	-0,90	1,81
	200	60,31	36,10	51,44	-1,03	-0,61	1,22
темне	20	53,09	30,99	55,46	-1,13	-1,14	2,30
	200	58,79	34,86	55,77	-1,69	-1,00	2,01

Таблиця 4 – Значення відстані ΔE між положенням точок кольорів діаграми колірності для значень яскравості адаптації L_A , рівних 20 і 200 кд/м² для яскравості стимулу, рівній 10 кд/м²

Оточення	I , нм						
	380	485	495	515	550	580	700
середнє	7,50	5,68	5,57	5,80	5,82	5,72	7,03
тьмяне	7,26	5,70	5,58	5,82	5,82	5,63	6,99
темне	7,02	5,63	5,50	5,72	5,74	5,47	6,89

Таблиця 5 – Значення відстані ΔE між положенням точок кольорів діаграми колірності для середнього і тьмяного оточення для значень яскравості адаптації L_A , рівних 20 і 200 кд/м² для яскравості стимулу, рівної 10 кд/м²

L_A	I , нм						
	380	485	495	515	550	580	700
20	7,83	6,73	6,69	6,65	6,58	6,48	6,24
200	8,41	6,74	6,70	6,65	6,57	6,47	6,21

Таблиця 6 – Значення відстані ΔE між положенням точок кольорів діаграми колірності для різних умов перенесення кольорів при яскравості стимулу, рівній 10 кд/м²

Умови зйомки L_{A1} і спостереження L_{A2}	I , нм						
	380	485	495	515	550	580	700
$L_{A1} = 200$ кд/м ² – середнє $L_{A2} = 20$ кд/м ² – тьмяне	12,39	8,51	8,4	8,51	8,53	8,59	9,55
$L_{A1} = 200$ кд/м ² – середнє $L_{A2} = 20$ кд/м ² – темне	18,16	13,18	13,01	13,07	13,02	13,02	13,89
$L_{A1} = 20$ кд/м ² – середнє $L_{A2} = 200$ кд/м ² – тьмяне	9,34	9,12	9,01	9,15	9,03	8,63	9,12

Таблиця 7 – Координати кольору точок діаграми колірності для $Y=50$

Оточення	L_A , кд/м ²	I , нм								
		380			485			495		
		a'_M	b'_M	J'	a'_M	b'_M	J'	a'_M	b'_M	J'
середнє	20	49,29	-65,84	75,23	-49,95	-29,39	70,29	-55,90	-7,51	71,60
	200	56,64	-69,14	71,90	-55,49	-32,30	70,32	-61,97	-8,17	71,70
тьмяне	20	46,59	-64,77	80,30	-48,42	-28,59	74,39	-54,17	-7,37	75,50
	200	53,16	-68,70	77,99	-53,88	-31,48	74,42	-60,16	-8,05	75,59
темне	20	43,59	-62,81	83,75	-46,24	-27,39	77,13	-51,72	-7,12	78,10
	200	49,50	-67,12	82,06	-51,58	-30,25	77,18	-57,58	-7,81	78,19

Продовження таблиці 7

Оточення	L_A , кд/м ²	I , нм								
		515			550			580		
		a'_M	b'_M	J'	a'_M	b'_M	J'	a'_M	b'_M	J'
середнє	20	-55,56	23,54	73,02	-38,31	44,81	75,85	-1,24	51,51	79,52
	200	-61,22	26,26	73,16	-42,02	49,99	76,02	-1,17	57,95	79,72
тьмяне	20	-53,93	22,69	76,72	-37,24	43,16	79,16	-1,44	49,30	82,34
	200	-59,53	25,34	76,84	-40,96	48,21	79,31	-1,42	55,54	82,51
темне	20	-51,62	21,57	79,17	-35,73	41,02	81,36	-1,61	46,58	84,19
	200	-57,14	24,13	79,29	-39,44	45,91	81,50	-1,64	52,59	84,34

Оточення	L_A , кд/м ²	I , нм					
		700			W		
		a'_M	b'_M	J'	a'_M	b'_M	J'
середнє	20	68,26	41,09	86,05	-1,55	-0,92	1,85
	200	74,04	45,48	86,30	-0,32	-0,19	0,38
тьмяне	20	65,93	39,35	87,92	-2,21	-1,31	2,65
	200	71,65	43,64	88,12	-1,49	-0,89	1,77
темне	20	63,09	37,29	89,13	-2,68	-1,58	3,23
	200	68,75	41,48	89,30	-2,33	-1,38	2,80

Таблиця 8 – Значення відстані ΔE між положенням точок кольорів діаграми колірності для значень яскравості адаптації L_A , рівних 20 і 200 кд/м² для яскравості стимулу, рівної 50 кд/м²

Оточення	I , нм						
	380	485	495	515	550	580	700
середнє	8,71	6,26	6,11	6,28	6,37	6,44	7,26
тьмяне	7,99	6,18	6,03	6,19	6,27	6,24	7,15
темне	7,50	6,05	5,90	6,09	6,14	6,01	7,04

Таблиця 9 – Значення відстані ΔE між положенням точок кольорів діаграми колірності для середнього і тьмяного оточення для значень яскравості адаптації L_A , рівних 20 і 200 кд/м² для яскравості стимулу, рівної 50 кд/м²

L_A	I , нм						
20	5,84	4,44	4,27	4,13	3,85	3,59	3,46
200	7,03	4,48	4,29	4,15	3,89	3,70	3,52

Таблиця 10 – Значення відстані ΔE між положенням точок кольорів діаграми колірності для різних умов перенесення кольорів при яскравості стимулу, рівній 50 кд/м²

Умови зйомки L_{A1} і спостереження L_{A2}	I , нм						
	380	485	495	515	550	580	700
$L_{A1} = 200$ кд/м ² – середнє $L_{A2} = 20$ кд/м ² – тьмяне	13,8	8,96	8,71	8,86	8,9	9,04	10,24
$L_{A1} = 200$ кд/м ² – середнє $L_{A2} = 20$ кд/м ² – темне	18,73	12,49	12,13	12,26	12,19	12,23	13,96
$L_{A1} = 20$ кд/м ² – середнє $L_{A2} = 200$ кд/м ² – тьмяне	5,55	6,07	5,86	5,80	5,53	5,02	4,72

Порівняння значень ΔE з оцінкою прояву на зображеннях спотворень

У роботі [33] даний зв'язок між величиною ΔE , що характеризує для відеозастосувань розбіжність між кольорами передаваної сцени і її зображення відповідно до таблиці 11, спотворення можуть досягати рівнів ледве помітних до неприпустимих.

З цією оцінкою порівнянні дані робіт [34, 35], представлені на малюнку 20.

Зіставлення приведених в таблицях 3–10 оцінок ΔE з даними таблиці 11 і малюнка 20 свідчить про те, що в умовах що незалежно змінюються оточення зображення і яскравості адаптації при зйомці на передавальній стороні і відтворенні на приймальній стороні може призводити до спотворень перенесення кольорів від рівня непомітних або ледве помітних до рівня неприпустимого зниження якості зображення.

Таблиця 11 – Співставлення відстані ΔE та рівня погіршення зображення

ΔE , од. МКО	Оцінка якості зображення
3	Не розрізняється зором людини
5	Прийнятне відхилення
10	Погано
15	Не допустимо

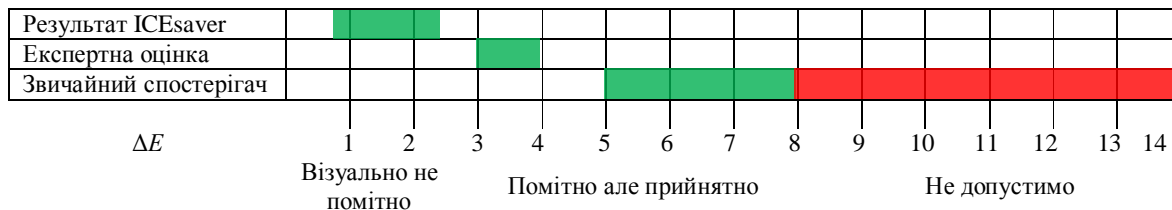


Рисунок 10 – Прояв спотворень в залежності від рівнів зміни відстані ΔE

Висновок

У документі СІЕ, що регламентує систему СІЕСАМ02 [1], для алгоритму прямого перетворення визначено три типи оточення оцінюваного стимулу: темне, тьмяне, середнє.

Оточення сцени при зйомці представляється можливим віднести до середнього, можливі інші, можливо, рідкісніше, варіанти, коли об'єкт зйомки оточений тьмяним або темним середовищем, і цим визначається безліч варіантів, що характеризують вплив оточення на цветовосприяття.

При відтворенні має місце спостереження зображення переважно в тьмяному оточенні, і це прийнято за основу для спостереження зображення на екрані дисплея в системі СІЕСАМ02, хоча можуть мати місце і інші варіанти оточення.

Слід також враховувати варіацію максимальної яскравості L_w передаваної сцени і відтворного зображення, оскільки максимальна яскравість передаваної сцени може варіюватися в довільних межах, а максимальна яскравість відтворного зображення обмежується характеристиками відтворюючого пристрою (ЕЛІТ, рідкокристалічні, плазмові або світлодіодні панелі, проекційні системи). У моделі СІЕСАМ02 прийняте, що яскравість адаптації $L_A = L_w / 5$. При цьому модель спирається на експериментальні дані, отримані для області значень яскравості в межах 1280 кд/м^2 .

Таким чином, на базі моделі СІЕСАМ02 умови спостереження можуть бути формалізовані шляхом завдання яскравості адаптації і вказівки типу оточення. Така формалізація визначає рамки, в яких діють оцінки цветовосприяття на базі моделі СІЕСАМ02.

Цим визначені вибрані в справжній роботі значення L_A 20 кд/м^2 до 200 кд/м^2 .

Ідеальним з точки зору вірності перенесення кольорів можна рахувати випадок, коли зйомка і спостереження відеозастосування здійснюються в одних і тих же умовах спостереження, наприклад, середня умова спостереження при одній і тій же яскравості адаптації, в цьому випадку людський зір

не помічає відмінності перенесення кольорів. Але на практиці зйомка відбувається практично в середніх умовах з яскравістю адаптації, що реально набуває значень в межах 20 кд/м^2 до 200 кд/м^2 , а відтворення відбувається в тьмяному середовищі або ж, у разі кінотеатру, темному середовищу з тією або іншою яскравістю адаптації. Також може впливати на перенесення кольорів і відмінність яскравості адаптації на передавальній і приймальній стороні. Зміна умов спостереження і яскравості адаптації впливають на перенесення кольорів. У статті був проведений аналіз цих умов і дані ним оцінки. У таблицях 3-10 приведені відповідні кількісні оцінки.

Наприклад, в таблиці 10 приведені значення для відносної яскравості стимулу $Y = 50 \text{ кд/м}^2$, і розглядається ситуація, коли зйомка здійснюється в умовах середнього оточення і яскравості адаптації 200 кд/м^2 , а спостереження відбувається в умовах тьмяного оточення і яскравості адаптації 20 кд/м^2 , в цьому випадку відстань ΔE більше 8,8. З точки зору даних, представлених на рисунку 20, можна вважати, що спотворення перенесення кольорів недопустимі.

У разі, коли значення яскравості адаптації будуть тими ж, а змінюються умови оточення, тобто зйомка здійснюється в умовах середнього оточення, а відтворення в умовах темного оточення, ΔE набуває значень більше 12,1, що говорить про неприпустимі спотворення кольоровідтворення.

У разі, коли зйомка здійснюється при яскравістю адаптації 20 кд/м^2 в умовах середнього оточення, а відтворення при яскравості адаптації 200 кд/м^2 і тьмяних умовах спостереження, ΔE лежить в межі 4,72 – 6,07, при цьому спотворення перенесення кольорів є помітними, але не приносять тимуть призводить до істотного зниження якості зображення.

Представлені оцінки дозволяють кількісно судити про можливу варіацію вірності кольоровідтворення з урахуванням можливої варіації умов колірної адаптації спостерігача. Ці оцінки можуть бути використані для судження про можливий ефект від переходу до нового типу телевізійних систем - адаптивних до умов спостереження передаваної сцени і відтворного зображення.

ЛІТЕРАТУРА

- 1 CIE 159:2004 Technical Report. *A Colour Appearance Model for Colour Management Systems: CIE-CAM02*
- 2 M. Ronnier Luo, Guihua Cui, Changjun Li *Uniform Colour Spaces based on CIECAM02 Colour Appearance Model* – Colour Research and Application, Volume 31, Issue 4, May 2005
- 3 J. Schanda, “CIE Colorimetry,” in *Colorimetry: Understanding the CIE system*, Kegelgasse 27,A-1030 Vienna, CIE central Bureau, 2006.
- 4 Youn Jin Kim, Seungok Park *CIECAM02-USC Based Evaluation of Colorimetric Characterization Modeling for a Liquid Display Using a Digital Still Camera* // OPTICAL REVIEW. – Vol. 17. – No. 3. – 2010. – Pp. 152–158.
- 5 Yi-Fan Chou, M.Ronnier Luo, Janos Schanda, Peter Csuti, Ferenc Szabo and G. S árvari *Recent Developments in Colour Rendering Indices and Their Impacts in Viewing Graphic Printed Materials* / Nineteenth Color Imaging Conference: Color Science and Engineering Systems, Technologies, and Applications. – San Jose, California. – November 2011. – P. 707-711.
- 6 Arto Kaarna *Introduction to Color Appearance Models* // Lappeenranta University of Technology. Department of Information Technology. Lappeenranta, Finland. Arto.Kaarna@lut.fi.
- 7 Гофайзен О.В. *Концепція адаптивного управління качеством изображения в ТВ системах будущего* / Праці УНДІРТ. – 1996. – № 2 (6). – С.97.
- 8 *On overview of the activities of the ITU in television colorimetry* / Chris J. Dalton (GB), Ken P. Devies (Canada), Oleg V. Gofaizen (Ukraine) / Proceedings of the CIE Expert Symposium'96. – 25 –27.03.96.
- 9 O. Gofaizen *Colour Reproduction Quality in TV Systems* / Proceedings of CIE Expert Symposium'97 on Colour Standards for Imaging Technology. – 21 –22.11.97.
- 10 ITU. SG-R. Ukraine. Report: *Colorimetric Quality of TV Images* / Doc. 11A/52-E, 07.11.96.
- 11 Ukraine. *Proposal for Draft New Question: Assessment and Optimization of Quality of Colour Reproduction in Television* / Doc. 11A/83-E, 11E/40-E, 01.04.97.
- 12 Ukraine. *Today Status of Colour Imaging Systems Design and Development and possible Ways of Assessment and Optimization of Colour Reproduction Quality in Digital TV Systems of Future* / Doc. 11A/35(A1)-E, 19.03.98.
- 13 Ukraine. Report: *Color Reproduction Quality Evaluation in Television* / Doc. 11A/70, 17.05.1999.

- 14 Ukraine. *Propositions on Modification of the Draft Report “Today status of colour imaging systems design and development and possible ways of assessment and optimization of colour reproduction quality in digital TV systems of future”* / Doc. 11A/73, 17.05.1999.
- 15 Ukraine. *Propositions on Amendment Preliminary Draft Recommendation “Assessment and Optimization of Quality of Color Reproduction in Television”* / Doc. 11A/66, 17.05.1999.
- 16 Vice-Chairman of Study Group 6 and Special Rapporteur of Working Party 6P on Assessment and Optimization of Colour Reproduction Quality in Television. *Report: Colour Reproduction Quality Assessment in Television* / Doc. 6A/46-E, 6P/148-E, 6Q/111-E, 3.09.2002.
- 17 Vice-Chairman, Study Group 6 and Vice-Chairman, Working Party 6P. *Study of influence of colour perception adaptation properties on colour reproduction quality in television with use of CIECAM97s colour appearance model: Estimations of colour space boundaries variation.* // Doc. 6P/25, 6Q/28, 22.09.2003.
- 18 Vice-Chairman, Study Group 6 and Vice-Chairman, Working Party 6P. *Study of influence of color perception adaptation properties on colour reproduction quality in television with use of CIECAM97s colour appearance model: Estimations of variation of colour space, reproduced in television* / Doc. 6P/26, 6Q/29, 22.09.2003.
- 19 Working Party 6P Draft Revision of Question ITU-R 97/6 *Optimization of quality of colour reproduction in television* / Doc. 6/17-E, 26.09.2003.
- 20 Vice-Chairman, Study Group 6 and Vice-Chairman, Working Party 6P. *Documenting of capture conditions of the scene objects for content production in TV systems, using object oriented representation of video information, and related applications* / Doc. 6P/60, 6Q/55, 26.04.2004
- 21 Vice-Chairman, Study Group 6 and Vice-Chairman, Working Party 6P. *Proposed modification of Preliminary Draft New Report “General principles and examples of technical solutions for optimization of colour reproduction quality in adaptive television systems and relative applications systems”* Doc. 6M/53, 6P/73, 6Q/71, 17.05.2004
- 22 Vice-Chairman, Study Group 6 and Vice-Chairman, Working Party 6P. *Quality of colour reproduction in television: Use of colour appearance models* / Doc. 6P/99, 6Q/85, 22.10.2004
- 23 Ukraine. *Proposed modification of Preliminary Draft New Report. General principles and examples of technical solutions for optimization of colour reproduction quality in adaptive television systems and related imaging systems* / Doc. 6P/126-E, 8.04.2005
- 24 Ukraine. *Current level of colour science and the problem of development of colour-adaptive TV and related systems* / Doc. 6P/127, 6Q/110E, 8 April 2005
- 25 Recommendation ITU-R BT.1691 *Adaptive image quality control in television systems*
- 26 Recommendation ITU-R BT.1692 *Optimization of the quality of colour reproduction in digital television*
- 27 The CIE 1997 *Interim Colour Appearance Model (Simple Version), CIECAM97s* / CIE TC1-34. –April, 1998
- 28 Гофайзен О. В., Тепухіна А. В. *Сучасний рівень колориметрії і проблема побудови адаптивних за кольором ТВ і споріднених їм систем* / Праці УНДІРТ. – № 1(41). – 2005
- 29 Гофайзен О. В., Тепухіна А. В., Комаров М. М. *Адаптивні до кольору системи цифрового телебачення майбутнього: принципи побудови та колориметричні основи* / Праці УНДІРТ. – № 2(42). – 2005
- 30 Гофайзен О.В., Тепухіна А.В. *Сучасний прогрес колориметрії й новітні принципи побудови цифрових мультимедійних і телевізійних відеосистем* / Праці УНДІРТ. – 2006. – № 1(45) – 2(46). – С. 43–45
- 31 Гофайзен О. В., Тепухіна О. В. *Загальні принципи та приклади технічних рішень для адаптивного управління якістю зображення в телебаченні* / Праці УНДІРТ. – № 2(54)–3(55). – 2008. – С.4–11
- 32 Гофайзен О. В., Тепухіна А. В. *Колориметричні характеристики телевізійних та мультимедійних систем* / Праці УНДІРТ № 2(54)2008–3(55)2008 – С.40–72
- 33 http://cs.haifa.ac.il/hagit/courses/ist/Lectures/IST05_ColorLAB.pdf
- 34 www.fineeyecolor.com/downloads/documentation/c/iceserver/datasheet.pdf
- 35 Новаковский С.В. *Цвет в цветном телевидении.*–М.: Радио и связь, 1988. – 288 с.: ил.