

ХАРАКТЕРИСТИКА КОЛІРНИХ ПРОСТОРІВ CIELAB ТА CIELUV НА CAS-ДІАГРАМІ

*На запропонованій CaS-діаграмі нового колірної простору ICaS проаналізовано колірні покриття різних систем подання кольору RGB (Adobe RGB, ECI RGB, sRGB). Досліджено взаємозв'язок апаратно-незалежних систем CIE L*a*b* та CIE L*u*v* з системою ICaS.*

*Color coverage of the different color presentation systems RGB (Adobe RGB, sRGB, ECI RGB) have been analysed on the suggested new color space CaS-diagram. Correlation between the device independent systems CIE L*a*b* and CIE L*u*v* and ICaS system has been analyzed.*

1. ФОРМУЛЮВАННЯ ПРОБЛЕМИ

Серед розроблених колірних просторів подання кольору найбільше застосування у програмному забезпеченні з опрацювання зображень у видавничих системах управління кольором має простір CIE L*a*b*. Його використовують як базову розрахункову апаратно-незалежну модель для виконання перерахунків колірних координат при переході з одного простору в інший.

Однією з головних причин, що підштовхнули різних дослідників до розробки рівноконтрасних колірних просторів, стало завдання з визначення колірних відмінностей між різними кольорами. У колориметрії відмінність між двома кольорами прийнято оцінювати величиною ΔE , яка розраховується як відстань між двома кольорами в колірному просторі. В силу того, що колірний простір CIE XYZ нерівномірний визначення ΔE у цій системі буде не вірним. Тому були розроблено більш рівноконтрастний (однорідний) колірний простір CIE L*a*b*, в якому виділяється ахроматична складова кольорів – яскравість L^* , та дві хроматичні компоненти: a^* , яка характеризує колірні відмінності в напрямі червоно-зелених кольорів і b^* – в напрямі жовто-синіх кольорів. У роботах [1, 2] достатньо повно описані переваги CIE L*a*b* як рівноконтрастного та «психологічно точного» простору. Незважаючи на це, простір CIE L*a*b* не враховує цілий ряд технологічних факторів та особливостей цифрової обробки видавничих оригіналів.

Зважаючи на це, виникла необхідність у створенні простору, який би максимально правильного відтворював кольори відповідно до їх

²³ Українська академія друкарства

²⁴ Інститут фізики конденсованих систем НАН України

сприйняття людським оком. Міжнародною комісією з освітлення (CIE) розроблена модель *CIECAM02* [3], яка є вдосконаленою версією моделі *CIECAM97s*. Ці системи були спробою створення єдиної універсальної моделі кольорового сприйняття, яка б враховувала недоліки *CIE L*a*b** через поправки, такі як хроматична адаптація за джерелом та загальним освітленням.

Ще одним простором подання кольору є *CIE L*u*v**, який, як і *CIE L*a*b**, базується на виділенні ахроматичної складової – яскравості (L^*), а також двох складових колірних відмінностей: червоного-зеленого u^* та жовто-синього v^* . Але, на відміну від *CIE L*a*b**, *CIE L*u*v** застосовує субтрактивний зсув координат колірності [2]. Розрахунки зміни хроматичної адаптації та відмінності кольорів у цій системі дають більші похибки у порівнянні з *CIE L*a*b**, тому *CIE L*u*v** практично не застосовують.

Ідею створення колірних просторів, які базуються на виділенні ахроматичної складової, реалізовано також в інших моделях, які мають прикладне значення та застосовуються у телебаченні, цифровій фотографії, тощо. Ці простори базуються на тому, що органи зору людини є менш чутливими до кольору предметів, ніж до його яскравості. Такими просторами є *YUV*, *YIQ*, *YCrCb*. Вони найбільш повно відповідають фізіологічній моделі розпізнавання кольорів, в якій кодована інформація у вигляді сигналу про яскравість зі всіх трьох типів колбочок посилається до опонентно-колірних клітин головного мозку, де розпізнавання кольорів відбувається саме у вигляді різницевого сигналу червоного-зеленого, та жовто-синього кольорів. Але усі вище зазначені колірні простори можна звести до єдиного нового універсального простору, який є їх узагальненням – *ICaS*. Розроблений простір [4] є ортогональним, матриця якого є узагальненням рівнянь хроматичних координат колірних моделей *YUV*, *YIQ*, *YCrCb*, *Photo YCC* [5].

В роботі проведено порівняння найбільш розповсюджених систем *RGB*, а також досліджено *CIE L*a*b** та *CIE L*u*v** на новому колірному просторі *ICaS* [4]. Колірний простір *ICaS* описується матрицею Хартлі 3×3 переходу від *RGB*-координат кольору до ахроматичної I і двох хроматичних C , S координат. Таке представлення є узагальненням відомих колірних просторів, які використовуються в телебаченні та цифровій фотографії.

Метою даної роботи є встановлення аналітичного взаємозв'язку систем *CIE L*a*b** та *CIE L*u*v** з системою *ICaS*.

2. ОРІЄНТАЦІЯ ХРОМАТИЧНИХ ОСЕЙ ТА ІЗОХРОМ
КОЛІРНИХ ПРОСТОРІВ CIELAB, CIELUV НА CAS-ДІАГРАМІ

2.1. Перерахунок координат кольору з простору CIE $L^*a^*b^*$ у CIE XYZ

Запишемо перехід від узагальнених координат кольору в просторі CIE $L^*a^*b^*$

$$L = \frac{L^*+16}{116}, \quad A = \frac{a^*}{500}, \quad B = \frac{b^*}{200} \quad (1)$$

до простору CIE XYZ у вигляді матричного рівняння [2, 3]

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ A \\ B \end{bmatrix}, \quad (2)$$

Звідси, за означенням простору CIE $L^*a^*b^*$ [6] перехід до Міжнародних координат кольору XYZ записується формулами

$$X' = X_0^3 = (L + A)^3, \quad Y' = Y_0^3 = L^3, \quad Z' = Z_0^3 = (L - B)^3. \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_w & 0 & 0 \\ 0 & Y_w & 0 \\ 0 & 0 & Z_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \mathbf{S} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де матриця \mathbf{S} хроматичної адаптації. Нами розглядається найбільш поширений для видавничих систем випадок джерела світла D65 [6]:

$$X_w = 0,9505; \quad Y_w = 1,00; \quad Z_w = 1,0888. \quad (5)$$

2.2. Перерахунок координат кольору з простору CIE $L^*u^*v^*$ у CIE XYZ

При переході з колірною простору CIE $L^*u^*v^*$ до простору XYZ також враховуємо еталонне джерело світла (5)

$$u_w = \frac{4X_w}{X_w + 15Y_w + 3Z_w}, \quad v_w = \frac{9Y_w}{X_w + 15Y_w + 3Z_w}, \quad (6)$$

звідси отримуємо координати u^*, v^*

$$u^* = U + u_w, \quad v^* = V + v_w, \quad \text{де } U = \frac{u}{13L^*}, \quad V = \frac{v}{13L^*}. \quad (7)$$

За означенням [6] перехід від простору CIE $L^*u^*v^*$ до координат кольору XYZ записується формулами

$$Y = Y_0 L^3; \quad X = Y \frac{9u^*}{4v^*}; \quad Z = Y \frac{12 - 3u^* - 20v^*}{4v^*}. \quad (8)$$

2.3. Перерахунок координат кольору з простору CIE XYZ у ICaS

Якщо визначені координати кольору XYZ, то перехід до простору RGB описується лінійним перетворенням [6]

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad (9)$$

Числові значення елементів m_{ij} матриці \mathbf{M} переходу до різних колірних просторів RGB є відомими [6].

Перейдемо від колірному простору RGB до нового ортогонального колірному простору ICaS [7]

$$\begin{bmatrix} I \\ C \\ S \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} k_R & 1-(k_R+k_B) & k_B \\ 1 & H_2 & -H_1 \\ 1 & -H_1 & H_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}; \quad (10)$$

де коефіцієнти $k_R = 0,299$; $k_B = 0,114$ відповідно до Рекомендацій ITU-R BT.601 [8, 9, 10]; $H_1 = (\sqrt{3}+1)/2$, $H_2 = (\sqrt{3}-1)/2$ - функції Хартлі, \mathbf{H} - матриця Хартлі розмірності 3×3 . В такому просторі довільний колір буде описуватися ахроматичною координатою I і двома хроматичними координатами C і S .

Якщо підставити вираз (4) в ортогональне перетворення (10), то в результаті отримуємо

$$\begin{bmatrix} I \\ C \\ S \end{bmatrix} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{M} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}. \quad (11)$$

На основі матричного рівняння (11) із врахуванням співвідношень (4) можна записати залежності хроматичних координат C і S простору ICaS з аналогічними хроматичними координатами a^* і b^* простору CIE $L^*a^*b^*$ та u^* і v^* простору CIE $L^*u^*v^*$.

$$\begin{aligned} C &= n_{21}(L+A)^3 + n_{22}L^3 + n_{23}(L-B)^3 \\ S &= n_{31}(L+A)^3 + n_{32}L^3 + n_{33}(L-B)^3 \end{aligned} \quad (12)$$

Звідси отримуємо важливі співвідношення

$$\frac{\partial C}{\partial A} = 3n_{21}(L+A)^2, \quad \frac{\partial S}{\partial A} = 3n_{31}(L+A)^2. \quad (13)$$

$$\frac{\partial C}{\partial B} = -3n_{23}(L-B)^2, \quad \frac{\partial S}{\partial B} = -3n_{33}(L-B)^2. \quad (14)$$

Таким чином на CaS -діаграмі хроматичні координати a^* і b^* простору $CIE L^*a^*b^*$ незалежно від величини ахроматичної координати L^* мають вигляд прямих ліній. На основі формул (13)-(14) кути нахилу ліній хроматичних координат a^* і b^* визначаються із формул

$$\varphi_{a^*} = \arctan\left(\frac{n_{31}}{n_{21}}\right), \quad \varphi_{b^*} = \arctan\left(\frac{n_{33}}{n_{23}}\right). \quad (15)$$

Залежності хроматичних координат C і S простору $ICaS$ з координатами простору $CIE L^*u^*v^*$ мають більш складний вигляд

$$C = L^3 \left[\frac{2,25n_{21}(U + 2,572L^*)}{V + 6,088L^*} + n_{22} + \frac{0,25n_{23}(26,52L^* - 3U - 20V)}{V + 6,088L^*} \right];$$

$$S = L^3 \left[\frac{2,25n_{31}(U + 2,572L^*)}{V + 6,088L^*} + n_{32} + \frac{0,25n_{33}(26,52L^* - 3U - 20V)}{V + 6,088L^*} \right]. \quad (16)$$

Звідси

$$\frac{\partial C}{\partial U} = \frac{L^3(2,25n_{21} - 0,75n_{23})}{(V + 6,088L^*)}, \quad \frac{\partial S}{\partial U} = \frac{L^3(2,25n_{31} - 0,75n_{33})}{(V + 6,088L^*)}, \quad (17)$$

$$\frac{\partial C}{\partial V} = -L^3 \left[\frac{(2,25U + 5,787L^*)n_{21} - (0,75U - 37,071L^*)n_{23}}{(V + 6,088L^*)^2} \right], \quad (18)$$

$$\frac{\partial S}{\partial V} = -L^3 \left[\frac{(2,25U + 5,787L^*)n_{31} - (0,75U - 37,071L^*)n_{33}}{(V + 6,088L^*)^2} \right].$$

Тоді кути нахилу ліній хроматичних координат u^* і v^* будуть визначаються із формул

$$\varphi_{u^*} = \arctan\left(\frac{3n_{31} - n_{33}}{3n_{21} - n_{23}}\right), \quad \varphi_{v^*} = \arctan\left(\frac{n_{31} + 6,4063n_{33}}{n_{21} + 6,4063n_{23}}\right). \quad (19)$$

2.4. Представлення колірних систем RGB на діаграмі $ICaS$

Досліджено взаємозв'язок існуючих систем подання кольору RGB із апаратно незалежною системою $ICaS$. Для цього на діаграмі $ICaS$ відкладали координати кольорів систем $Adobe RGB$, $ECI RGB$, $sRGB$. Попередньо, за допомогою програми Maple, здійснювали перерахунок координат кольорів зі $CIE L^*a^*b^*$ та $CIE L^*u^*v^*$ в $ICaS$ за схемою: $CIE L^*a^*b^*$, $CIE L^*u^*v^* \rightarrow XYZ \rightarrow$ одна із систем подання кольору $RGB \rightarrow ICaS$. Для кожного виду системи RGB враховували джерело випромінювання білого і відповідні матриці \mathbf{M} переходу.

Для порівняння на діаграмі *ICaS* побудовано охоплення чистих кольорів *RYGCBM*, яке має форму правильного шестикутника з центром на початку координат (див. рис. 1).

Усі покриття досліджуваних систем на діаграмі *ICaS* для $L^* = 50$ мають форму чотирикутників. Кути нахилу координат систем *Adobe RGB*, *ECI RGB*, *sRGB* до координат *ICaS* є різними.

Встановлено, що кути нахилу умовних прямих, на яких відкладали координати кольорів, перерахованих для різних значень $CIE L^*a^*b^*$, є паралельними та постійними в межах охоплення кожної системи.

Таблиця 1

Кути взаємного розміщення осей систем $CIE L^*a^*b^*$, $CIE L^*u^*v^*$ на *CaS*-діаграмі для різних систем *RGB*

Система подання кольору	$CIE L^*a^*b^*$			$CIE L^*u^*v^*$		
	Кути нахилу осей систем до осі <i>C</i> , градуси		Кут між осями систем, градуси	Кути нахилу осей систем до осі <i>C</i> , градуси		Кут між осями систем, градуси
	φ_{a^*}	φ_{b^*}	φ_{a^*,b^*}	φ_{u^*}	φ_{v^*}	φ_{u^*,v^*}
Adobe RGB	63,664	0,999	62,665	56,464	18,821	75,285
ECI RGB	66,115	7,439	73,554	55,924	22,677	78,602
sRGB	58,496	4,994	53,502	53,355	20,181	73,536

Найменші кутові відхилення відносно *ICaS* спостерігаються для системи *Adobe RGB*, так як горизонтальна вісь φ_{a^*} системи $CIE L^*a^*b^*$, майже співпадає з віссю *C*, а вертикальна вісь утворює з нею кут – $\varphi_{a^*} = 63,664^\circ$. Досліджували також кут між координатами самих систем (див. табл. 1). Кут між осями різних систем *RGB* на *CaS*-діаграмі змінюється в залежності від виду системи *RGB* в межах від $53,5^\circ$ до $78,6^\circ$ (для рівня яскравості 50).

Отримані графічно кути нахилу координат досліджуваних систем на *CaS*-діаграмі підтверджуються розрахунковим методом. Розрахунки проводили за допомогою програм Maple та Origin. Характерно, що кути нахилу координат систем *RGB* на *CaS*-діаграмі є постійними для всіх рівнів яскравості L^* .

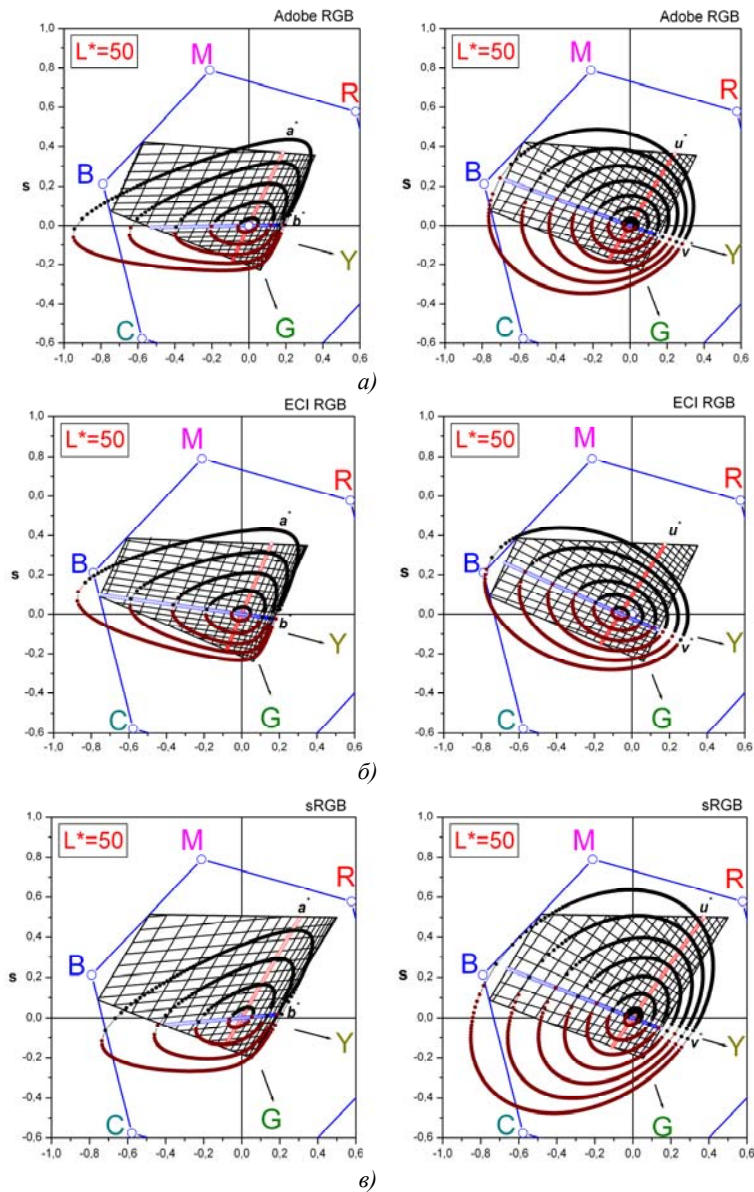


Рис. 1. Покриття (відтворення) різних систем RGB на CaS-діаграмі для рівня яскравості $L^*=50$: а)-Adobe RGB, б)-ECI RGB, в)-sRGB та криві ізохром колірних відмінностей з кроком $\Delta E=20$ для CIE $L^*a^*b^*$ (зліва), CIE $L^*u^*v^*$ (справа)

2.5. Колірні відмінності на CaS-діаграмі

Вдосконалення методів оцінювання колірних відмінностей являє собою предмет вищої метрики кольору. Для оцінювання колірних відмінностей необхідно, щоб відстань в колірному просторі між точками, які відповідають двом кольорам, відповідала візуально рівній відмінності цих кольорів. Але існуючі методики та метрики оцінювання якості кольоровідтворення зображень не до кінця враховують специфіку сприйняття зоровим аналізатором людини відмінностей у кольорі.

Для розрахунку величини ΔE існують різні формули. Як правило, всі вони визначають ΔE як евклідову відстань між точками, що позначають два порівнюваних між собою кольори в рівноконтрастному колірному просторі (наприклад, $CIE L^*u^*v^*$ або $CIE L^*a^*b^*$). Формула, ухвалена МКО в 1976 р. для розрахунку ΔE , має наступний вигляд [11]

$$\Delta E_{a^*b^*} = \left[(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right]^{1/2}, \quad (20)$$

де $\Delta a^* = a_2^* - a_1^*$, $\Delta b^* = b_2^* - b_1^*$, a_1^*, b_1^* – колірні координати оригіналу, а a_2^*, b_2^* – колірні координати відбитку. Ці вимірювання дозволяють оперативно встановити необхідність коригування режиму друку, наприклад подачі фарби або зволожуючого розчину або внесення кольорокорективів на стадії додрукарської підготовки форм.

Ця формула дозволяє досить просто обчислити колірну відмінність між двома зразками, проте істотним недоліком її є те, що при оцінюванні двох зразків, що значно відрізняються між собою, вона завищує фактичну величину відмінності між кольорами, а також допускає деяку помилку внаслідок нелінійності шкали колірності.

Науково-дослідні організації з вивчення кольору запропонували нові рішення з оцінювання колірної відмінності. Основне завдання цих розробок – покращити узгодження оцінки з візуальним сприйняттям кольору. Тому були запропоновані формули, наприклад, ΔE_{CMC} , ΔE_{1994} , які постійно вдосконалювалися.

На початку 2000 року з'явилося нове оцінювання колірної відмінності ΔE_{2000} , яке враховує не лише співвідношення світлоти, насиченості і колірного тону, але і їх взаємний вплив один на одного залежно від розташування в колірному просторі:

$$\Delta E_{2000} = \left[\left(\frac{\Delta L}{K_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{K_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{K_H S_H} \right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C}{K_C S_C} \right) \left(\frac{\Delta H}{K_H S_H} \right) \right]^{1/2} \quad (21)$$

Якщо визначати відмінність між кольороми з однаковою яскравістю відносно нейтрально-сірого кольору, які будемо називати ізохромами, то формула (21) набуває наступного вигляду

$$\Delta E_{2000} = \left[\left(\frac{\Delta C}{K_C S_C} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (22)$$

де $\Delta C = C1 - C2 = \left[(\Delta a_1')^2 + (\Delta b_1^*)^2 \right]^{1/2} - \left[(\Delta a_2')^2 + (\Delta b_2^*)^2 \right]^{1/2}$ насиченість. Коefіцієнт $K_C = 1$, а $S_C = 1 + 0,045\bar{C}$ $S_C = 1 + 0,045\bar{C}$, де \bar{C} – середнє значення насиченості двох кольорів. Ці коефіцієнти забезпечують кращу кореляцію результату розрахунку з даними візуальної оцінки.

Важливим є те, що до хроматичних координат a_1^* , a_2^* вводиться поправка G

$$G = 0.5 \left[1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^7}{\bar{C}^7 + 25^7}} \right], \quad (23)$$

яку обов'язково необхідно врахувати на подальших етапах розрахунку при визначенні a_1' та a_2'

$$a_i' = (1 + G)a_i^*. \quad (24)$$

Міжнародна комісія з освітлення запропонувала оптимальну формулу (24) для розрахунку колірної відмінності, що забезпечує найбільш точне узгодження між візуальною і колориметричною оцінками за рахунок введення коефіцієнта R_T . Проте через деяку інертність регламентуючих органів роботи по апробації і впровадженню в практику її ведуться дуже повільно.

Зважаючи на те, що в перетворенні з XYZ в $CIE L^*a^*b^*$ використовуються формули, що містять кубічні корені, $CIE L^*a^*b^*$ являє собою нелінійну систему. Це ускладнює застосування звичних операцій над 3-х мірними векторами. Дві найбільш застосовувані формули колірної відмінності [6] в програмах обробки зображень – ΔE 1976, що обчислюється як відстань між точками в просторі Евкліда (квадратний корінь з суми квадратів різниць координат), і ΔE 2000, пізніший стандарт, що дає набагато кращий результат, але в той же час надзвичайно складний для аналізу результатів обчислень.

Для порівняння та оцінювання $CIE L^*a^*b^*$ та $CIE L^*u^*v^*$ на CaS -діаграмі використовували величину колірних відмінностей (20). Для цього було побудовано сімейство ізохром постійних значень ΔE з кроком у 20 одиниць (10, 30, 50, 70, 90) за їх координатами a^* , b^* .

Кожен з порівнювальних просторів утворює на ортогональній CaS -діаграмі замкнуті криві ізохром постійних значень ΔE – неправильної форми еліпси зі зміщеним центром. Наближення отриманих замкнутих кривих до еліпса вказує на наближення фізичних відстаней між кольорами до фізіологічних відмінностей. Це підтверджує те, що моделі $CIE L^*a^*b^*$ та

$CIE L^*u^*v^*$ тільки частково враховують сприйняття кольору людиною. Краще у порівнянні з $CIE L^*a^*b^*$ це здійснює простір $CIE L^*u^*v^*$.

При порівнянні еліпсів ΔE кольорних просторів $CIE L^*a^*b^*$ та $CIE L^*u^*v^*$ перерахованих через *Adobe RGB*, *ECI RGB* та *sRGB* варто зазначити, що найкраще здійснювати перерахунок через простір *Adobe RGB*, ізохроми якого найбільш наближені до еліптичних.

Якщо на *CaS*-діаграмі на будь-якому побудованому еліпсі (див. рис. 1) задати колір, то для нього завжди існує реальний симетричний (відносно центру координат) доповнювальний колір, координати якого легко визначити з діаграми не проводячи додаткових розрахунків.

Визначимо величину ΔE в кольорному просторі *ICaS* через *RGB*-координати. На основі рівняння (9) запишемо ахроматичну координату розкладеною за *R*, *G*, *B*-координатами кольору

$$I^* = k_R R + (1 - k_R - k_B) G + k_B B \quad (25)$$

Із врахування фізіології людського зору координата *G* є визначальною. Виділимо цю координату

$$G = \frac{I^* - k_R R - k_B B}{1 - k_R - k_B}. \quad (26)$$

Підставивши її в рівняння (9), отримаємо загальне матричне рівняння хроматичних координат кольору *C* та *S* [5]

$$\begin{bmatrix} C \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R - I^* \\ B - I^* \end{bmatrix}, \quad (27)$$

Таким чином, хроматичні координати *C*, *S* завжди можна представити лінійною комбінацією різницевої координат: $(R-I)$ – “червоний” мінус “нейтрально-сірий” колір; $(B-I)$ – “синій” мінус “нейтрально-сірий” колір. Рівняння (25) пояснює сучасну теорію кольорного зору за якою інформація кодується через опонентні сигнали у вигляді різницевої сигналів яскравості та *R* і *B* кольорів.

Отже, величина кольорної відмінності ΔE_{CaS} двох кольорів

$$\Delta E_{CaS} = (\Delta C^2 + \Delta S^2)^{1/2} = \left(a_{RR} (\Delta R - \Delta I^*)^2 + a_{BB} (\Delta B - \Delta I^*)^2 + a_{RB} (\Delta R - \Delta I^*) (\Delta B - \Delta I^*) \right)^{1/2}, \quad (28)$$

де коефіцієнти a_{RR} , a_{BB} , a_{RB} визначаються елементами t_{ij} матриці (27).

Отримана формула (28) в загальному випадку описує сімейство ізохром у вигляді еліпсів і подібна до формули (21) розрахунку ΔE_{2000} , де коефіцієнт a_{RB} , як і коефіцієнт R_T враховує відповідність фізіологічної та колориметричної оцінки кольору.

На відміну від $CIE L^*a^*b^*$ та $CIE L^*u^*v^*$, постійні значення ΔE на *CaS*-діаграмі утворюють правильні еліпси, внаслідок чого значно

спрощується визначення координат доповнювальних кольорів, що в поліграфії є важливим при опрацюванні графічної інформації, кольорокоректуванні, дизайні, створенні плашок основних кольорів системи *RYGCBM*, виборі кольорів контрольних шкал тощо.

3. ВИСНОВКИ

1. Розрахована орієнтація хроматичних осей колірних просторів $CIE L^*a^*b^*$ та $CIE L^*u^*v^*$, а також різних систем *RGB* на *CaS*-діаграмі. Встановлено, що хроматичні координати a^* і b^* простору $CIE L^*a^*b^*$ та u^* і v^* простору $CIE L^*u^*v^*$ незалежно від величини ахроматичної складової L^* мають вигляд прямих ліній, нахилених під певними кутами до осей C та S . Найменші кутові відхилення відносно *ICaS* спостерігаються для колірного простору $CIE L^*a^*b^*$ при перерахунку через *Adobe RGB*.

2. На *ICaS*-діаграмі проведений порівняльний аналіз ізохром однакових колірних відмінностей просторів $CIE L^*a^*b^*$ та $CIE L^*u^*v^*$. Простір $CIE L^*u^*v^*$ забезпечує утворення правильних еліпсів наближених до кола. З трьох досліджуваних систем *RGB* рекомендується для перерахунку простір *Adobe RGB*.

3. Для простору *ICaS* отримано загальне рівняння, яке описує колірні відмінності ΔE_{CaS} різних кольорів через R , B - координати, яке максимально враховує фізіологічні та колориметричні оцінки кольору. На основі *CaS*-діаграми можна оцінювати колірні простори та визначати координати доповнювальних кольорів, які необхідні у додрукарських процесах при опрацюванні та контролюванні кольорового зображення, створенні шкал, дизайні.

1. Хьюбел Д. Глаз мозг, зрение. – М.: Мир, 1990. – 239 с. 2. Hoffmann G. *CIE Lab Color Space*: <http://www.fho-empden.de/%7Ehoffmann>. 3. Fairchild, Mark D. *Color Appearance Models, 2nd Edition, Inc.* 2004. – 408 p. 4. Шовгенюк М.В. Новий кольоровий простір *ICaS* на основі перетворення Хартлі // Препринт ІФКС НАН України, 2009. 5. Предко Х.Б. Рівняння хроматичних координат кольору / Х.Б. Предко, М.Р. Крик, М.В. Шовгенюк // Технологія і техніка друкарства. –2010. – №2. – С.28-37. 6. *RGB/XYZ Matrices*: <http://www.brucelindbloom.com>. 7. Wyszecki G. *Matching color differences*, *J. Opt.Soc.Am.*, 55, 1319, 1965. 8. ITU-R Rec. BT.601, *Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide-screen 16:9 aspect ratios* (Geneva: ITU). 9. РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R BT.1700. *Характеристики составных сигналов видео для стандартных аналоговых систем телевидения*, 2005. 10. Poynton C. *Digital video and HDTV algorithms and interfaces*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2003. 11. Wyszecki G., Fielder G. *Color-difference matches*, *J. Opt.Soc.Am.*, 61, 1501, 1971.