

КОЛІРНІ ВІДМІННОСТІ: МЕТОДИКИ ТА ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКІВ

*Проведено порівняння відомих методик розрахунку колірних відмінностей. Побудовано еліпси колірних відмінностей на діаграмі CIE L*a*b* за різними методиками розрахунку ΔE . Оцінено достовірність розрахункових значень за допомогою статистичного індексу STRESS.*

*Comparison the known methods of calculation color difference is conducted. The ellipses of color differences are built on the diagram CIE L*a*b* for different methods of calculation ΔE . Estimation accuracy calculated using a statistical index STRESS.*

1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Людський зір вважається одним з найбільш чутливих вимірювальних приладів, але він не може чисельно оцінювати колір, точно його запам'ятовувати, а отже об'єктивно порівнювати кольори. Сприйняття кольору визначається не тільки фізіологічними, а й психологічними особливостями людини та має суб'єктивний характер.

Існує п'ять візуальних порівняльних методів визначення колірної відмінності: фотометричний, порівняльний, послідовний, тимчасовий і по пам'яті. Для кожного з них може бути оцінена ймовірна точність та визначено можливий допуск на відхилення. Перший метод використовує граничні психофізичні можливості очей, а останній зводиться до суто психологічного зіставлення по пам'яті; інші методи займають проміжне положення. Різниця між граничними випадками становить за величиною кілька порядків, проте кожен візуальний метод порівняння пов'язаний з психологічними особливостями сприйняття кольору людиною.

Розрізняють прийнятну та візуальну колірні відмінності. Візуальна відмінність завжди менша або дорівнює прийнятній колірній відмінності, тому що остання, крім фізичних, фізіологічних та психологічних, враховує комерційні чинники.

Тому виникла необхідність у розробці стандартів кількісного оцінювання кольору, а також у систематизації способів відтворення кольору, що одержали назву колориметричних методів. Результати вимірювань у вигляді трьох колориметричних координат кольору дають

¹ Українська академія друкарства

можливість використовувати їх у програмних продуктах. Вимірювання колірної різниці дозволяє оперативно встановити необхідність коригування режиму друку, наприклад подачі фарби, зволожувального розчину або внесення корективів на стадії додрукарської підготовки, наприклад, кольорокоректування тощо. При визначенні кольору паперу, фарб, а також колірних відмінностей Міжнародні стандарти ISO 12647-2, ISO 12647-7 оперують виключно колориметричними характеристиками, регламентуючи допустимі значення колірних відмінностей (ΔE) [1, 2, 3].

Розробка надійних формул розрахунку колірної відмінності дозволяє використовувати об'єктивну колориметрію для вирішення наступних практичних завдань у поліграфії

- у системах управління кольором при налаштуванні устаткування на заданий результат;
- встановлення об'єктивних колірних допусків на кольоропробу, друкування тиражу і перевірка відповідності взірців цим допускам;
- об'єктивне оцінювання колірних параметрів та кольоростійкості друкарських фарб, лаків та інших покриттів;
- сортування за кольором – розбиття зразків кольору на групи із заданою величиною колірної відмінності всередині групи як складової кваліметричного оцінювання поліграфічної продукції;
- дизайнерська розробка колірних взірців;
- узгодження колірних параметрів поліграфічної продукції з замовником;
- розроблення та затвердження контрольних колірних елементів (шкал, еталонів).

Більшість з перерахованих застосувань формули колірної відмінності мають на меті уникнути суб'єктивізму візуальних оцінок. Основні недоліки суб'єктивізму – недотримання стандартних умов візуальних оцінок (якість освітлення, фон, сіра шкала і т.д.) та індивідуальних особливостей спостерігачів.

2. ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ

Відмінність між двома кольорами розраховується різними способами на основі математичної різниці координат двох кольорів. Якщо використовувати для цієї мети координати кольору в просторі XYZ, тоді визначення ΔE не буде точним через нерівномірність цього колірного простору. Тому ΔE визначається як різниця між двома кольорами в одному з рівноконтрасних (однорідних) колірних просторів (наприклад, CIE L*a*b*). Величина $\Delta E = 1$ од. CIE L*a*b* відповідає порозу колірної відмінності – найменшій колірній відмінності, що помічається

кваліфікованим спостерігачем в стандартних умовах спостереження. Сучасні технології друку забезпечують величину відповідності кольору відбитку з оригіналом в межах $\Delta E = 1,5-6$ од. СІЕ $L^*a^*b^*$. Величина $\Delta E > 6$ од. СІЕ $L^*a^*b^*$ відповідатиме суттєвій різниці між двома кольорами. За даними виробників фарби, які надходять у друкарню, можуть мати відхилення до 1,5-2,0 одиниці, а друкарський процес може спричинити відхилення до 2-5 одиниць ΔE і більше. При ретельному налаштуванні друкарської машини ці значення можна зменшити, але у виробничих умовах ΔE менше за 2,0-2,5 досягнути практично важко.

Ідеальною була б єдина метрика колірних відмінностей, яку можна розглядати як пропорційну шкалу відмінностей між колірними відчуттями. Проте, добре відомо, що колірний простір СІЕ $L^*a^*b^*$ нерівномірний і не може задовольнити цим вимогам, більше того – поставлене завдання практично не має вирішення ні в одному з відомих колірних просторів, тому вдосконалення розрахункових формул ΔE проводиться в напрямку їх відповідності з візуальними відмінностями та виправлення недоліків існуючих колірних просторів.

Відомо понад 40 різних формул для розрахунку колірної відмінності, які базуються на тристимульних значеннях. Як правило, ΔE визначають як евклідову відстань між точками, що позначають два порівнюваних між собою кольори в рівноконтрасному колірному просторі (наприклад, СІЕ $L^*u^*v^*$ або СІЕ $L^*a^*b^*$).

Формула колірної відмінності ΔE 1976 стала однією з двох перших формул рекомендованих МКО в якості єдиної міри візуальної відмінності. Але практичне її використання показало необхідність подальшого її уточнення. Оцінювання надійності формул колірної відмінності є складною проблемою. В першому наближенні однієї з характеристик придатності формул є відсоток помилкових рішень. Дослідження Мак Дональда показали, що формула ANLAB 40, спрощенням якої є формула колірних відмінностей ΔE 1976, дає приблизно 20% помилкових рішень, у той час як візуальні оцінки тільки 17%.

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

де $\Delta a^* = a_1^* - a_2^*$, $\Delta b^* = b_1^* - b_2^*$, $\Delta L^* = L_1^* - L_2^*$, L_1^* , a_1^* – колірні координати оригіналу, а L_2^* , a_2^* , b_2^* – колірні координати відбитку.

Ця формула дозволяє досить просто обчислити колірну відмінність між двома зразками, проте має істотний недолік, що при оцінюванні двох зразків, що значно різняться між собою, завищує фактичну величину відмінності між ними, а також припускається помилки внаслідок нелінійності шкали колірності.

Першою модифікацією ΔE 1976, що знайшла промислове застосування, стала JPC 79, яка є формулою скоріше прийнятних, а не візуальних відмінностей і, на основі якої, отримано ΔE СМС.

Практичні випробування показали, що формула ΔE СМС набагато краще корелює з візуальними оцінками малих і середніх колірних відмінностей та відповідає величині порогової колірної різниці середньостатистичного спостерігача. ΔE СМС була прийнята як стандарт оцінки загальної колірної відмінності у Великобританії, США та ISO.

Наступною спробою стала формула VFD, опублікована у 1987 р. Маючи складнішу в порівнянні з ΔE СМС структуру, вона не вносить до визначення колірної відмінності нічого принципово нового і, за даними Луо (Luo) та Рігга (Rigg), дає деяке поліпшення узгодженості з візуальними оцінками [4].

У 1994 році була затверджена формула ΔE , яка, крім різниці координат L^* , a^* і b^* в колірному просторі CIE $L^*a^*b^*$, враховує також різницю між координатами колірності (H) і насиченості (C) колірного простору CIELCH:

$$\Delta E_{1994} = \sqrt{\left[\left(\frac{\Delta L}{k_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{k_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H_{ab}}{k_H S_H} \right)^2 \right]}, \quad (3)$$

де $S_L = 1$, $S_C = 1 + 0,045Cab$, $S_H = 1 + 0,015Cab$, де Cab – це CIE $L^*a^*b^*$ насиченість стандартного зразка (найближчого до пари порівняння) або середнє геометричне двох величин насиченості зразків порівняння; k_L , k_C і k_H – параметричні коефіцієнти, призначені для корекції можливих варіацій колірних відмінностей, викликаних експериментальними змінними (розміром зразка, текстурою і ін.). У стандартних умовах перегляду параметричні коефіцієнти дорівнюють 1.0.

Основне завдання вдосконалення формули колірної відмінності – покращити узгодження оцінки з візуальним сприйняттям кольору.

На початку 2000 року розроблено 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 у колірному просторі:

$$\Delta E_{2000} = \sqrt{\left[\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H} \right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C} \right)^2 \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H} \right)^2 \right]} \quad (4)$$

Якщо визначати відмінність між кольорами з однаковою яскравістю відносно нейтрально-сірого кольору, то формула (4) набуває наступного вигляду

$$\Delta E_{2000} = \left[\left(\frac{\Delta C}{K_C S_C} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (5)$$

$$\text{де насиченість } \Delta C = C_1 - C_2 = \left[(\Delta a_1')^2 + (\Delta b_1)^2 \right]^{1/2} - \left[(\Delta a_2')^2 + (\Delta b_2)^2 \right]^{1/2}.$$

Коефіцієнти $K_C = 1$, $S_C = 1 + 0,045\bar{C}$, $S_C = 1 + 0,045\bar{C}$, де \bar{C} – середнє значення насиченості двох кольорів. Ці коефіцієнти забезпечують кращу кореляцію результату розрахунку з даними візуальної оцінки. Важливим є те, що до значення координат a_1, a_2 вводиться поправка G

$$G = 0.5 \left[1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^7}{\bar{C}^7 + 25^7}} \right], \quad (6)$$

яку обов'язково враховують при визначенні a_1' та a_2' $a_{1,2}' = (1+G)a_{1,2}$. ΔE_{2000} включає 5 різних поправок у СІЕ $L^*a^*b^*$. Найбільш важливою поправкою є вагова функція колірної відмінності, яку ще раніше запропонував Мак Дональд [5].

В програмах обробки зображень у комп'ютерно-видавничих системах найбільше використовуються дві формули колірної відмінності – ΔE_{1976} і ΔE_{2000} . Остання забезпечує кращий результат, але в той же час складна для аналізу результатів обчислень та має ряд недоліків, тому ймовірно, за припущенням деяких дослідників, СІЕ $L^*a^*b^*$ є не кращою вихідною точкою для майбутньої формули розрахунку колірної відмінності.

Для підтвердження нерівномірності СІЕ $L^*a^*b^*$ на площині a^*b^* будували еліпси однакових колірних відмінностей, розрахованих за різними методиками. З цією метою була розроблена спеціальна програма розрахунку колірних відмінностей за ΔE_{1976} , ΔE_{1994} , ΔE_{2000} .

При обчисленні колірних відмінностей за формулою ΔE_{1976} були отримані ізохромні у формі кіл. Зменшення або збільшення значення ΔE веде до відповідної зміни діаметрів кіл без зміни їх форми.

При розрахунку за ΔE_{1994} кола-ізохромні перетворюються в еліпси, які збільшуються у розмірах і витягуються, віддаляючись від центру (див. рис. 1).

Введення поправочних коефіцієнтів у формулу ΔE_{2000} у порівнянні з ΔE_{1994} веде до нерівномірного видовження еліпсів у різних квадрантах діаграми a^*b^* . Візуально це спостерігається для синьоголубих відтінків у квадрантах IV ($+a^*, -b^*$) та III ($-a^*, -b^*$). Ймовірно, розробники формули ΔE_{2000} хотіли наблизити розрахункові колірні відмінності до особливостей людського зору в цій області.

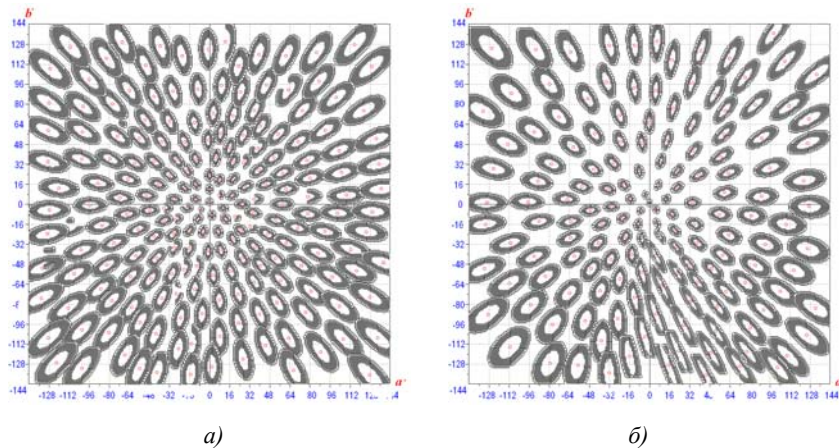


Рис. 1. Еліпси однакових колірних відмінностей ($\Delta E=5$) на діаграмі a^*b^* для рівня яскравості $L^*=50$, розраховані за формулами – а) ΔE 1994, б) ΔE 2000

Дослідження та вдосконалення формул продовжується. Над ними працюють три технічні комітети CIE TC 1-55 «New color space for industrial color-difference evaluation» під керівництвом М. Melgosa, TC 1-63 «Validity of the range CIEDE2000» під керівництвом К. Richter, TC 8-02 «Evaluation of color-differences in images» під керівництвом М. R. Luo. Вивчається вплив умов проведення експериментів з візуального оцінювання, а саме "параметричних факторів" на ΔE [6, 7]. Наприклад, технічний комітет CIE TC 1-63 досліджує формулу розрахунку ΔE 2000 зі зміною текстури взірців та величини ΔE , CIE TC 8-02 вивчає колірні відмінності для зображення з врахуванням впливу оточення тощо.

Критерієм оцінювання розрахункових ΔE є візуальні колірні відмінності (ΔV), між ними повинна бути висока кореляція. З вдосконаленням методик отримання ΔV вдосконалюються формули розрахунку ΔE , які забезпечують дані наближені до візуальних. Для отримання відтворюваних ΔV вибирають стандартизовані умови перегляду та спостерегачів. Дані з визначення ΔV різними дослідниками також можуть різнитися. При виборі методики визначення ΔV враховують її обмеження та складність. Найбільше практичне застосування мають дві методики: парного порівняння (Pair Comparison) та за сірою шкалою (Grey Scale Assessment). Загально визнані достовірні візуальні дані отримали RIT-DuPont, Berns, Leeds, Witt, Luo.

Оцінити відповідність візуальних та розрахункових значень колірних відмінностей, а також обчислених за різними формулами, можна

за допомогою статистичних індексів PF/3 або STRESS. З їх допомогою можна визначити, яка колірна модель передбачає краще сприйняття колірних відмінностей і, отже, яка модель є більш рівномірною. Індекс STRESS запропонував Гарсія (García) у 2007 році на основі багатовимірної метрики Крускала (Kruskal), а індекс PF/3 – Луо (Luo) у 1999 році.

Індекс PF (Performance Factor) визначався спочатку за чотирма, а на даний час – за трьома величинами (PF/3), кожна з яких розраховується за окремою формулою [9].

Статистичний індекс STRESS (STandardized REsidual Sum of Squares) стандартизована залишкова сума квадратів розраховується за формулою [8].

$$STRESS = \left(\frac{\sum (\Delta E_i - F \Delta V_i)^2}{\sum F^2 \Delta V_i^2} \right)^{1/2} \quad (7)$$

де F – коефіцієнт масштабування ΔV до ΔE . $F = \frac{\sum \Delta E_i^2}{\sum E_i \Delta V_i}$.

Якщо PF/3 та STRESS дорівнюють 0 колірна відмінність між візуальними та розрахунковими значеннями відсутня.

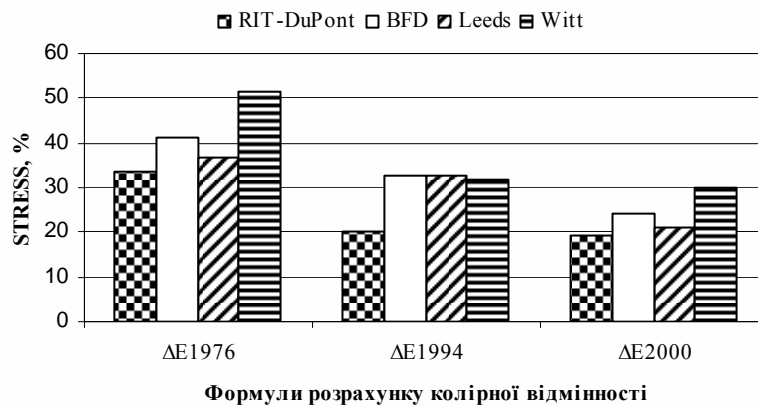


Рис. 2. Порівняння формул розрахунку колірної різниці за різними візуальними даними [10]

Відповідність розрахункових значень колірних відмінностей візуальним постійно покращується. На рис. 2 приведені значення статистичного індексу для колірних відмінностей, обчислених за трьома фор-

мулами, запропонованими CIE, та візуальними даними, отриманими RIT-DuPont, BFD, Leeds та Witt. Усереднене за різними візуальними даними зменшення статистичного індексу STRESS за ΔE 1994 у порівнянні з ΔE 1976 спостерігається на 11,8 одиниць, а ΔE 2000 у порівнянні з ΔE 1994 тільки на 4,6 одиниць. Отже, наближення розрахункових відмінностей до візуальних все більше утруднюється, що підтверджує непридатність для цього CIE $L^*a^*b^*$.

Досліджуються вже розроблені методики, наприклад, прогнозування колірної різниці за ΔE 1994 покращилось через використання Лідсом і Віттом (Leeds and Witt) методу регресії гаусовських процесів (GPR), що забезпечило дещо менше значення показника STRESS (26,58) у порівнянні з ΔE 2000 (27,49) [11].

На сьогодні встановлено, що CIE $L^*a^*b^*$ та CIE $L^*u^*v^*$ не можуть моделювати контекстуальні ефекти кольоросприйняття, що включають адаптацію до яскравості (оточуючого освітлення різних рівнів), хроматичний контраст або хроматичну асиміляцію, яка виникає в реальних умовах перегляду з гетерогенними, сильно контрастними або тривимірними колірними стимулами. На даний час CIE TC 1-55, CIE TC 8-02 досліджують нові формули колірної відмінності, які базуються на CIECAM02 [12] та OSA UCS (Optical Society of America Uniform Color Scales) просторах [13, 14]. Колірні відмінності, розраховані за CIECAM, є складнішими у порівнянні з CIE $L^*a^*b^*$ та потребують більше вихідних даних.

$$\Delta E_{CAM-SCD} = \left((\Delta J)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2 \right)^{1/2} \quad (8)$$

Формула розрахунку колірної відмінності GP (Granada-Parma) [15]:

$$\Delta E_{GP,E} = \left((\Delta L_{OSA,E})^2 + (\Delta G_E)^2 + (\Delta J_E)^2 \right)^{1/2} \quad (9)$$

Показник STRESS для GP є дещо більший за значення для ΔE 2000, але формула GP простіша і у більшій мірі враховує фізіологію зору людини.

За даними [16] отримання надійних розрахункових результатів, які корелюють на 80-85% з візуальною оцінкою, було б вельми бажаним.

3. ВИСНОВКИ

Абсолютно точно спрогнозувати колірні відмінності практично важко, поки не створено метрично однорідного простору кольоросприйняття. Проте подальші вдосконалення колірних моделей повинні покращити відповідність розрахункових та візуальних значень, що сприятиме управлінню кольором на усіх стадіях його відтворення у поліграфії. Розроблені в останнє десятиліття формули колірної відмінності дозволяють оцінювати загальну колірну відмінність з достат-

ньою для практики точністю, що перевищує точність, яку забезпечує пересічний спостерігач.

1. ISO 12647-2:2004 *Технологія поліграфії. Управління технологічним процесом при виготовленні растрових кольороподілених зображень, пробних і тиражних відбитків. Частина 2. Процеси офсетної літографії. 2. Стандарти в поліграфії.* <http://www.allprint.com.ua/articles,review,1,7.htm>. 3. Грибунин А. Цветопробу – на контроль // *Флексография и специальные виды печати №2, 2007*: <http://www.publish.ru/articles/4393619/text/4416502.html>. 4. Luo M.R. *Development of Colour-Difference Formulae. Review of Progress in Coloration, 2002, 32, p. 28.* 5. McDonald R. *J. Soc Dyers Colour. 90, 1974, 189-198.* 6. Melgosa M. *Testing CIELAB-Based Color-Difference Formulas. Departamento de Optica, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada (Spain) John Wiley & Sons, Inc. Col Res, Volume 25, Number 1, February, 2000, 49-55.* 7. Lissner I. and Urban P. *How Perceptually Uniform Can a Hue Linear Color Space Be? Institute of Printing Science and Technology, Technische Universit at Darmstadt / Germany 18th Color Imaging Conference Final Program and Proceedings / Society for Imaging Science and Technology, 2010, 97-102.* 8. García P.A., Huertas R., Melgosa M., Cui G.. *JOSA A, 24 (7), 2007, 1823-1829.* 9. Shen S. *Color Difference Formula and Uniform Color Space Modeling and Evaluation A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Color Science in the Center for Imaging Science, Rochester Institute of Technology, 2009, p.157.* 10. Lissner I., Urban P. *Improving Color-Difference Formulas Using Visual Data. Institute of Printing Science and Technology, Technische Universit. at Darmstadt. Final Program and Proceedings 2010 Society for Imaging Science and Technology, 2010, pp. 483-488.* 11. Lissner I. and Urban P. *Upgrading color-difference formulas, J. Opt. Soc. Am. A 27, 2010, pp. 1620-1629.* 12. Luo M.R., et al. *Color Res. Appl. 31, 2006, pp. 320-330.* 13. Huertas R., Melgosa M., Oleari C. *Performance of a color-difference formula based on OSA-UCS space using small-medium color differences," J. Opt. Soc. Am. A 23, 2006, pp. 2077-2084: <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=josaa-23-9-2077>* 14. Huertas R. et al. *J. Opt. Soc. Am. A 23, 2006, pp. 2077-2084.* 15. Oleari C. et al. *JOSA A 26, 2009. pp.121-134.* 16. Cardenas L. M. *Evaluation of Variability in Visual Assessment of Small Color Differences. A dissertation submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University In partial fulfillment of the Requirements for the degree of Doctor of Philosophy Fiber and Polymer Science. Raleigh, North Carolina, 2009. – p. 124.*