

УДК 655.255+77.01

ОЦІНЮВАННЯ ЯКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИФРОВОГО ПІВТОНОВОГО ЗОБРАЖЕННЯ

М. М. Дубневич

*Українська академія друкарства,
вул. Під Голоском, 19, Львів, 79020, Україна*

Викладено методикку визначення одного з найважливіших показників якості фотографічного зображення у цифровій формі — кольоровідтворення. Згідно з цією методикою проаналізовано колірні характеристики фото, отриманих різними моделями цифрової фототехніки, оснащених світлочутливими матрицями з КМОП та ПЗЗ елементів. Досліджено, що незалежно від способу реєстрування світлового сигналу, колірні характеристики фотозображення залежать від характеристик засобів сепарування колірної інформації.

Ключові слова: *фотографічне зображення, світлочутлива матриця, сепарування кольору, масив світлофільтрів, багатошарова матриця, кольороподільні недоліки, ефективна густина кольорового зображення.*

Постановка проблеми. Цифрові (електронні) способи реєстрування світлового сигналу стали на сьогодні найуживанішим методом отримання видавничих тонових повноколірних оригіналів, оскільки дають змогу оптимізувати видавничий процес. Видавничі образотворчі оригінали підлягають вхідному контролю за низкою параметрів. На сьогодні не існує нормативної документації, яка б регламентувала показники якості цифрових тонових зображень, що пояснюється великим різноманіттям способів їх отримання і постійним удосконаленням технологій. Однак можна виділити такі показники якості цифрового кольорового тонового зображення: тоновідтворення, колірний баланс, відтворення дрібних деталей та чіткість зображення, відсутність дефектів на зображенні (шумів та ін.). Особливу увагу приділяють якісним (кольороподільним) та кількісним (градаційним) характеристикам зображень незалежно від форми їх подання, оскільки саме ці характеристики якоюсь мірою зумовлюють якісне відтворення змісту образотворчого оригіналу на поліграфічному відбитку.

Тоновідтворення та кольоровідтворення під час зйомки будь-якою фототехнікою, зокрема цифровою, залежать від багатьох факторів: розподіл яскравості об'єкта зйомки (здатність відбивати чи поглинати певні зони спектру), особливості освітлення (потужність та спектральний склад випромінювання джерела світла), характеристика оптики (світлосила об'єктиву), параметрів експонари (поєднання витримки та діафрагми), типу і характеристик сепаруючих середовищ (приспосіблення для реєстрування одноколірних компонент складного випромінювання), характеристики світлочутливих сенсорів. Об'єктивне оцінювання якісних

характеристик цифрового тонового зображення — це обов'язкова складова технологічного процесу додрукарського опрацювання образотворчого оригінала.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Цифрові фотографічні зображення давно уже є стандартом у якості видавничих оригіналів, однак дотепер не існує нормативної документації, яка б регламентувала їхні якісні характеристики. Окремі автори [5, 7] описують, як оцінювати структурні характеристики півтонового зображення у цифровому представленні, інші [8, 9] наводять суб'єктивну класифікацію фотозображень на «якісні» та неякісні, описують оптимальний на їхню думку розподіл у яскравості пікселів по усьому тоновому діапазону зображення. Однак у літературних джерелах не трапляється чітко сформульованих у вигляді чисельних значень критеріїв якості тоно- чи кольоровідтворення.

Мета статті. У цифрових і фотокамерах немає можливості зчитувати зображення порядково, як у сканерах. Кадр повинен оцифровуватися миттєво вцілому, тому в якості світлочутливого середовища застосовуються прямокутні матриці з ПЗЗ- (прилади із зарядовим зв'язком) або КМОП-елементів (комплементарні метал-оксидні півпровідники), у яких число комірок по горизонталі й вертикалі відповідає розміру одержуваного зображення. Величина генерованого сигналу у елементарному осередку матриці визначає яскравість елементарної ділянки зображення і у майбутньому — оптичну густину на поліграфічному відбитку. Градаційна характеристика цифрового тонового зображення залежить від того, наскільки пропорційно реагують елементарні сенсори на світловий потік різної потужності.

Самі по собі елементи ПЗЗ або КМОП не мають вибіркової світлочутливості до зон спектра (рис. 1.), тому для реєстрування одноколірних складових розроблені методи з використанням відповідних оптичних пристроїв. Точність реєстрування одноколірних складових цифрових тонових зображень залежить від спектральних характеристик сепаруючих середовищ, встановлених у конкретній моделі фотоапарата.

світлочутливість

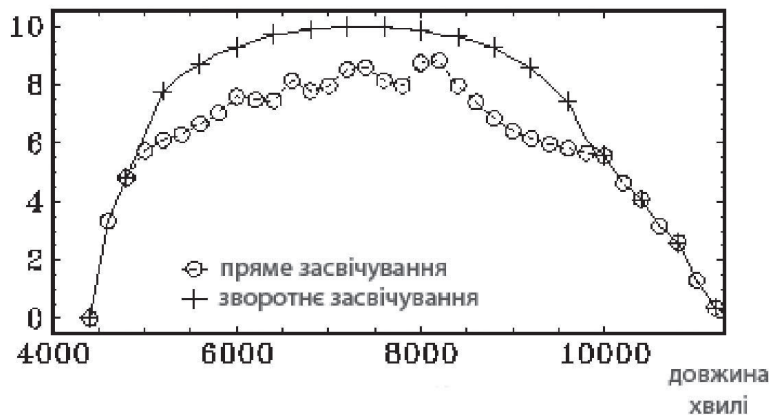


Рис. 1. Спектральна світлочутливість ПЗЗ та КМОП [6]

Мета статі — здійснити оцінювання якості кольоровідтворення півтонових цифрових зображень, згідно з розробленою методикою, а також проаналізувати показники якості відтворення кольірних складових фотозображень, отриманих моделями фототехніки різного класу, оснащених різними типами світлочутливих матриць.

Виклад основного матеріалу дослідження. Літературні джерела подають інформацію про широкий спектр засобів для реєстрування одноколірних складових світлочутливими матрицями цифрової фототехніки [1, 2, 6]. Деякі з них мають спільні риси, тому доречно класифікувати їхтак:

1. Реєстрування окремих повнокадрових однофарбових складових (технологія почергового сканування через три окремі світлофільтри, які уже не застосовують на практиці через технічні обмеження, та мультиматричні системи, які експлуатуються у відеокамерах).

2. Поелементне реєстрування одноколірних складових із застосуванням системи забарвлених світлофільтрів і наступним математичним опрацюванням інформації про колір (система фільтрів Байєра (найпоширеніший спосіб) та її видозміни, CFA-матриця фірми Kodak з частковим фільтруванням кольорів [2, 12]).

3. Реєстрування повноколірного повнокадрового зображення (багатошарові матриці фірми Foveon, мультиспектральні фотодіоди TFA, RGB-матриці фірми Nikon [1, 11]).

Сьогодні практично усі моделі цифрових фотоапаратів оснащені сенсором з, так званим, «шаблоном Байєра» — RGBG-фільтри Байєра, що розробив у 1976 році науковий співробітник компанії Kodak доктор Брас Байєр. Шаблон Байєра складається з світлофільтрів трьох кольорів адитивного синтезу, кожен з яких накриває одну елементарну комірку світлочутливої матриці (один фотоелемент). Отже, для кожного елемента зображення лише одна кольорова компонента зареєстрована оптичною системою, решта дві розраховуються за відповідними інтерполяційними алгоритмами на основі аналізу даних про колір, зареєстрований суміжними світлочутливими елементами [11].

Масив світлофільтрів Байєра може мати різну організацію: класичний варіант RGBG; RGBE — фільтр компанії Sony, коли до RGB-фільтрів додали смарагдовий (зелено-голубий) — E (emerald); мозаїки світлофільтрів кольорів субтрактивного синтезу — CMYG виробництва тієї ж компанії Sony; розробка компанії Fujifilm в матриці Fujifilm X-Trans з відмінностями лише у структурі масиву [11, 12]; технологія піксельного зсуву, яка полягає у використанні звичайного сенсора з фільтром Байєра, але у поєднанні з механізмом попіксельного зсуву в площині зображення за допомогою п'єзоелементів [12]; масив світлофільтрів RGBW, названий CFA-сенсором Kodak (color filter array), у якому до класичного байєрівського масиву додано так звані панхроматичні пікселі [6]. Головним недоліком цього способу реєстрування інформації про колір в усіх перерахованих варіантах полягає у застосуванні самих світлофільтрів з тими ж недоліками, як і світлофільтри у скануючих пристроях, тобто з перекриттям зон пропускання (рис. 2).

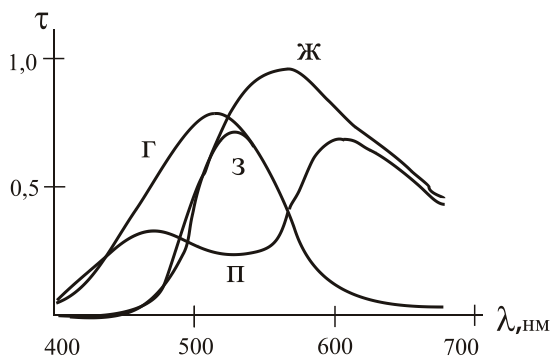


Рис. 2. Відносні спектральні характеристики кольороподільних світлофільтрів світлочутливої матриці цифрової фототехніки для різних систем реєстрування одноколірних складових [9]

Принципово інший спосіб реєстрування кольорових променів запропонувала ще у 2002 році компанія Foveon (США), розробивши сенсор ХЗ, що складається з трьох шарів, у кожному з яких фотоефект спричинюють лише фотони певної частоти (довжини хвилі) з різною проникаючою здатністю [1]. Отже, у кожному з шарів реєструється світловий сигнал однієї третьої видимого спектра і один універсальний приймач реєструє три колірні компоненти елементарної частини зображення (пікселя). Однак матриці Foveon ХЗ охоплюють дуже малий сегмент ринку і сам виробник визнає, що кольоровідтворення ще далеке від ідеалу [1].

У 2007 році фірма Nikon запатентувала матрицю з принципово іншим методом реєстрування кольору (Nikon-RGB-матриця), у яких сепарування здійснюється за допомогою кольороподільних дихроїчних дзеркал у кожному пікселі зображення [2]. Через технічну складність промислового застосування ця технологія не знайшла.

З вищезазначених засобів реєстрування кольорів найпоширенішим є спосіб з використанням світлофільтрів як найоптимальніший за співвідношенням «ціна-якість». Водночас саме у цьому технічному рішенні застосовують для сепарування кольору світлофільтри з описаними вище оптичними недоліками. Одним із способів покращення кольоровідтворення під час трансформування інформації про колір від оригіналу до поліграфічного відбитка є застосування систем управління кольором — Color Management System (CMS). Головне завдання CMS — узгодження кольорових охоплень різних колориметричних систем пристроїв введення та виведення (візуалізації) інформації у видавничі системи, а також перетворення координат кольору із однієї кольорової системи в іншу.

Оскільки на кольоровідтворення цифровою фототехнікою суттєво впливають змінні характеристики різних джерел світла (а саме — спектральний склад випромінювання), що використовують під час фотографування, тому для отримання задовільного результату, калібрування варто проводити для кожного фотографування за кожних змінних умов освітлення. Водночас зміні підлягає як інтенсивність світлового потоку, так і його спектральний склад, що особливо критично для

кольоровідтворення. Отриманий у такий спосіб профіль матиме строго вузьке застосування для кадрів, отриманих лише за цих конкретних умов експонування. У кожному окремому випадку процедуру профілювання варто виконати повторно.

Отож профілювання процесу фотографування цифровою фототехнікою є дуже трудомістким і має низку технічних обмежень [3]:

- забезпечення однотипності умов освітлення фотографованого об'єкта (застосування однакових джерел світла з строго контрольованою кольоровою температурою, відсутність у кадрі стороннього освітлення іншого спектрального складу, рівномірність освітлення об'єкта);
- тест-об'єкт має розташовуватися у кадрі у такий спосіб, щоб уникнути рефлексів від джерел світла та розташованих поряд сторонніх об'єктів, що порушить відповідність колориметричних координат полів самого тест-об'єкта;
- освітлення тест-об'єкта має бути рівномірним по інтенсивності світлового потоку, а сама експозиція точно розрахованою, щоб уникнути недо- та переэкспонування;
- під час фотографування варто деактивувати алгоритми покращення якісних та кількісних характеристик фотографічного зображення, які за замовчуванням задіяні програмним забезпеченням фототехніки на етапі опрацювання даних зі світлочутливої матриці.

Оскільки перелічені технічні труднощі обмежують застосування технологій управління кольором можна припустити, що на цифрових півтонових зображеннях наявні недоліки кольоровідтворення, що потребує об'єктивного аналізу їх якісних характеристик.

Для аналізу якісних характеристик цифрових фотографічних зображень пропонується розроблений спосіб аналітичного представлення кольороподільних характеристик через перерахунок актинічностей у значення відповідних ефективних густин [4, 10]. У результаті сепарування оптичної інформації світлофільтрами фотореєструючої системи зображення формується у трьох каналах. Процес кольороподілу зображають у вигляді трьох рівнянь (1):

$$\begin{aligned} D_c^{ef} &= \alpha_c^{jc} D_c^{jc} + \alpha_c^n D_3^n + \alpha_c^z D_4^z \\ D_3^{ef} &= \alpha_3^{jc} D_c^{jc} + \alpha_3^n D_3^n + \alpha_3^z D_4^z \\ D_4^{ef} &= \alpha_4^{jc} D_c^{jc} + \alpha_4^n D_3^n + \alpha_4^z D_4^z \end{aligned} \quad (1)$$

де D_c^{ef} , D_3^{ef} , D_4^{ef} — ефективні густини щодо синього, зеленого, червоного світлочутливих приймачів; D_c^{jc} , D_3^n , D_4^z — монохроматичні густини одноколірних складових (умовна кількість барвників синтезу); α_c^{jc} , α_c^n , ..., α_c^z — кутові коефіцієнти, що характеризують приріст ефективних густин на одиницю приросту кількості барвника оригіналу (питомі ефективні густини).

За умови ідеального кольороподілу ефективна густина кольорової ділянки зображення щодо одного з трьох світлочутливих приймачів визначається лише вмістом барвника кольору, доповняльного до кольору зони спектральної чутливості приймача. Тобто у кожному рівнянні (1) два з трьох кутових коефіцієнтів мають прямувати до нуля. Ступінь відхилення від сформульованої умови визначає

величину кольороподільних спотворень. Значення питомих ефективних густин зводимо у матриці кольороподілу (2).

$$(\alpha) = \begin{pmatrix} \alpha_c^{жс} & \alpha_c^n & \alpha_c^e \\ \alpha_3^{жс} & \alpha_3^n & \alpha_3^e \\ \alpha_4^{жс} & \alpha_4^n & \alpha_4^e \end{pmatrix}, \quad (\beta) = \begin{pmatrix} \beta_c^u & \beta_c^3 & \beta_c^c \\ \beta_3^u & \beta_3^3 & \beta_3^c \\ \beta_4^u & \beta_4^3 & \beta_4^c \end{pmatrix}. \quad (2)$$

За ідеального кольороподілу варто забезпечити, щоб діагональні члени матриці дорівнювали одиниці, а недіагональні — нулю (3). Тобто чим ближча матриця кольороподільних характеристик до одиничної, тим кращим є реєстрування однофарбових складових приймачами світлового сигналу [4].

$$(A) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (B) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Згідно з викладеною методикою проаналізуємо кольоровідтворення фотографічних зображень, отриманих двома моделями цифрової фототехніки, оснащених різними типами світлочутливих матриць. У фотоапараті півпрофесійного класу FinePix S7000 (Fuji) з ПЗЗ-матрицею та у професійній фотокамері EOS-D20 (Canon) з КМОП-матрицею. Для сепарування одноколірних складових повноколірного зображення в обох моделях фотокамер застосовано масив світлофільтрів Байєра, оптичні недоліки яких описані вище (рис. 2).

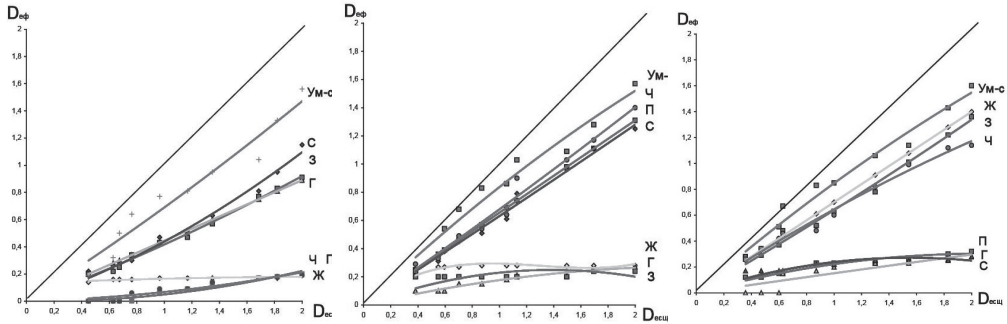
На рис. 3 зображено графічні залежності, що ілюструють вміст барвників поліграфічного синтезу на кольороподілених часткових зображеннях відповідних фото. Куткові коефіцієнти кривих зведено у матриці кольороподілу чистих та бінарних кольорів ((4) — фото, отримане ПЗЗ-матрицею, (5) — фото, отримане КМОП-матрицею).

$$(\alpha) = \begin{pmatrix} 0,81 & 0,21 & 0,12 \\ 0 & 0,68 & 0 \\ 0,14 & 0,16 & 0,53 \end{pmatrix}, \quad (\beta) = \begin{pmatrix} 0,67 & 0,84 & 0,23 \\ 0,68 & 0,14 & 0,7 \\ 0,14 & 0,49 & 0,53 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

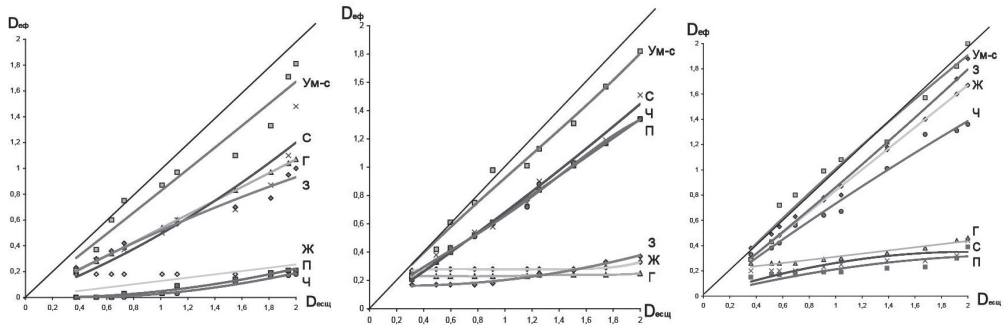
$$(\alpha) = \begin{pmatrix} 0,65 & 0,19 & 0,16 \\ 0,12 & 0,65 & 0,19 \\ 0 & 0,12 & 0,42 \end{pmatrix}, \quad (\beta) = \begin{pmatrix} 0,62 & 0,58 & 0,21 \\ 0,70 & 0,18 & 0,62 \\ 0,12 & 0,42 & 0,47 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Однією з найважливіших вимог до кольорових ілюстраційних оригіналів є брак кольороподільних спотворень або хоча б мінімальна їх величина. Матриці кольороподілу для фотозображень, отриманих фотокамерами FinePix S7000 (Fuji) (4) та EOS-D20 (Canon) (5), суттєво відрізняються від одиничних, що свідчить про неідеальне реєстрування одноколірних складових та наявність недоліків кольоровідтворення. Як відомо, кольороподільні спотворення поділяються на два типи: за недостатньої кількості барвника на виділених кольорах та за надлишком барвника на невиділених кольорах. Матриці кольороподілу фотозображень свідчать про наявність насамперед недоліків кольоровідтворення за недостатньої кількості барвника

на виділених кольорах: корисні контрасти значно нижчі від одиниці (0,42, 0,47, 0,49). Характерно, що на зображенні, отриманому півпрофесійною фотокамерою з ПЗЗ-матрицею, цей недолік проявляється меншою мірою, ніж у зображення, отриманого професійною фотокамерою з КМОП-матрицею. Надлишок барвника на невиділених кольорах на обох зображеннях є дуже незначним (шкідливі контрасти не перевищують 0,21-0,23). Очевидно, що світлофільтри, застосовані в обох класах фототехніки є досить вузькозональними, що і зумовило такі кольороподільні характеристики.



а) кольороподільні характеристики фотозображення, отриманого фотокамерою EOS-D20 (Canon) (КМОП-матриця)



б) кольороподільні характеристики фотозображення, отриманого фотокамерою FinePix S7000 (Fuji) (ПЗЗ-матриця)

Рис. 3. Графічне представлення кольороподільних характеристик цифрових фотозображень

Висновки. Отримані результати свідчать, що застосування як сепаруючі середовища світлофільтрів з оптичними недоліками та обмежене застосування технологій управління кольором під час фотографування цифровою фототехнікою призводять до отримання фотозображень з недоліками кольоровідтворення. Водночас тип світлочутливої матриці не впливає на кольоровідтворення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Foveon X3. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Foveon_X3.
2. Nikon's new full-color RGB sensor. URL: <https://www.dpreview.com/articles/6555348105/nikonimagesensor>.
3. Дубневич М., Тимченко О. Роль систем управління кольором для кольоровідтворення поліграфічної продукції. Збірник Наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова. Київ, 2014. Випуск 70. С. 139–144.
4. Дубневич М. М. Удосконалення процесу кольоровідтворення фотографічних зображень у видавничих системах: автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.05.01 «машини і процеси поліграфічного виробництва». Львів, 2015.
5. Критерии профессиональной оценки фотографии. URL: http://www.fotokonkurs.ru/blogs/personal_Yagor21/682.
6. Матричный ПЗС с разделением цветовых сигналов. URL: www.ista-tech.ru.
7. Методика оценки качества изображения по уровню разрешения и уровню шумов. URL: <https://www.ixbt.com/digimage/res-noises.shtml>.
8. Перова С. Стандарты качества в коммерческой фотографии. URL: <http://www.zastavkin.com/html/lessons/quality/index.html>.
9. Сурашов Н. Т., Вавилов А. В., Елемес Д. Е. Теория цвета и цветовоспроизведения: учеб. пособие. Алматы : КазНТУ, 2014. 241 с.
10. Ференц М. М. Вплив параметрів субтрактивних координат на кольороподільні характеристики комп'ютерних зображень. Наукові записки: наук.-техн. збірн. Львів : УАД, 2000. № 3. С. 57–59.
11. Фовеон против Байера с точки зрения рядового фотографа URL: <http://photogeos.ru/testy-fototekhniki/foveon-protiv-bayera-s-tochki-zreniya-ryadovogo-fotografa>.
12. Фотореєстраційні процеси на несрібних матеріалах / Дудяк В., Дубневич М., Занько Н., Писанчин Н. Львів : УАД, 2007. 112 с.
13. Шанидзе И., Повшенко А. Анализ фотографического изображения. URL: https://rosphoto.com/photo-lessons/analiz_fotograficheskogo_izobrazeniya-405.

**ESTIMATION OF QUALITATIVE CHARACTERISTICS
OF THE DIGITAL HALFTONE IMAGE**

M. M. Dubnevych

*Ukrainian Academy of Printing,
19, Pid Holoskom St., Lviv, 79020, Ukraine*

Modern technologies of receiving a halftone image develop constantly, that pre-determines the difficulties in the formulation of clear criteria to the estimation of their quality and means of realization of the process of qualimetric estimation itself. The article presents the methodology determining one of major indices of photographic image quality in a digital form – colour reproduction. According to this methodology, colour descriptions of the photos received from different models of digital photographic

technique, equipped with photosensitive matrices with CMOS and CCD elements have been analysed. It has been studied, that regardless of the method of light signal logging, colour descriptions of photos depend on the descriptions of means of colour information separation.

Keywords: *photographic image, photosensitive matrix, colour separation, array of colour filters, multi-layered matrix, colour separation defects, effective density of the coloured image.*

Стаття надійшла до редакції 00.00.2018.