

УДК 681.6:774

## ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ФАРБ У ЦИФРОВОМУ ДРУЦІ

М. Р. Семенів<sup>1</sup>, В. В. Семенів<sup>2</sup>, Н. С. Снігур<sup>2</sup>, М. Т. Вонсович<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний університет «Львівська політехніка»,  
вул. С. Бандери, 28, Львів, 79013, Україна

<sup>2</sup>Українська академія друкарства  
вул. Під Голоском, 19, Львів, 79020, Україна

*Досліджено особливості впровадження технології ICaS-ColorPrint для оптимізації витрат чорнил і тонерів у цифровому друці. Експериментальні дослідження проводилися на цифрових пристроях струминного та електрографічного друку компаній Xerox, Konica Minolta та Epson. Описано методику перерахунку кольорів для визначення базових векторів кольорів фарб та показника нелінійності. Обґрунтовано необхідність застосування ортогонального колірнього простору ICaS при розв'язуванні рівнянь автотипного синтезу. Визначено показники нелінійності градацій фарб на основі колориметричних вимірювань відбитків для досліджуваних умов друку. Проаналізовано можливості адаптації розроблених методів обробки цифрових оригіналів для різних пристроїв цифрового друку. Проведено оцінювання ефективності економії ресурсів і якості друкованої продукції. Результати дослідження демонструють перспективність технології кольороподілу ICaS-ColorPrint для зниження витрат і підвищення екологічності друкарських процесів, забезпечуючи при цьому стабільну якість друку.*

**Ключові слова:** кольороподіл, цифровий друк, автотипний синтез, оптимізація витрат фарб, колірні відмінності.

**Постановка проблеми.** Цифровий друк у сучасному світі демонструє стрімке зростання, перевершуючи інші сектори поліграфічної галузі та поступово перетворюючись на серйозного конкурента традиційним способам друку. Впровадження технологій, які виключають процес виготовлення друкарських форм або використовують спеціалізовані матеріали для цього етапу, забезпечує високу оперативність, якість і гнучкість друкарського процесу.

Здатність цифрового друку забезпечувати продуктивність і якість, які не поступаються традиційним методам, сприяла його широкому розповсюдженню. Значна кількість провідних компаній, серед яких Hewlett-Packard, Canon, Fujifilm, Konica Minolta, Kodak, MGI, Ricoh, Screen, Toshiba, Xante, Xerox, розробляють інноваційні рішення в галузі цифрового друку, що стимулює розвиток цього сегмента.

За прогнозами аналітичної компанії Smithers Pira, до 2025 року частка цифрового друку на світовому ринку поліграфічних послуг становитиме 21,4%, що

еквівалентно понад 230 мільярдам доларів США. Обсяг друкованої продукції, створеної за допомогою цифрових технологій, сягне 5% від загальної кількості друкованих матеріалів. Особливо швидкими темпами розвиваються сегменти, де потрібна персоналізація, зокрема друк етикеток, упаковки, рекламної продукції та книг на вимогу. Наприклад, прогнозується, що сегмент цифрового друку етикеток зростатиме на 9,5% щороку до 2030 року, а попит на персоналізовану рекламу збільшуватиметься на 8% щорічно [1].

Однак цифровий друк характеризується значними витратами на матеріали, зокрема чорнила та тонери, які можуть становити до 40% собівартості продукції. У зв'язку з цим питання оптимізації витрат стає все більш актуальним. Одним із важливих технологічних етапів є перетворення зображень із моделі RGB у CMYK, яке здійснюється за допомогою ICC-профілів чи драйверів, специфічних для кожного пристрою. Некоректні налаштування цих профілів можуть призводити до перевитрати чорнил, особливо у випадках друку з високою насиченістю кольорів, коли витрати можуть перевищувати необхідний обсяг на 10–15%.

Для вирішення цієї проблеми активно впроваджуються технології економії витратних матеріалів, такі як GCR (Gray Component Replacement) та UCR (Under Color Removal). Ці методи дозволяють знижувати споживання кольорових компонентів шляхом заміни їх чорним тонером, що забезпечує економію до 15–25% чорнила або тонера. Водночас ефективність цих технологій залежить від типу друкарського обладнання. Наприклад, струменеві принтери з п'єзоелектричною технологією демонструють кращий контроль витрат чорнила порівняно з термічними струменевими принтерами, а лазерні принтери вимагають точного налаштування ICC-профілів для забезпечення якості друку [2].

Таким чином, оптимізація витрат чорнил і тонерів у цифровому друці є багатокомпонентною проблемою, яка охоплює економічні, технологічні та організаційні аспекти. Розробка універсальних ICC-профілів, удосконалення алгоритмів управління кольором і впровадження інноваційних рішень у налаштування друкарського обладнання сприяють не лише зниженню витрат, але й забезпеченню стабільно високої якості продукції, що є визначальним фактором у сучасних умовах конкурентного середовища.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Актуальні дослідження у сфері цифрового друку демонструють значний прогрес у вдосконаленні технологій кольоровідтворення, використанні стійких матеріалів, інтеграції нових методів контролю якості та розширенні функціональності друкарських систем. У дослідженні [3] Yujia Li та співавтори пропонують два новаторські підходи для зменшення кольорних відмінностей між оригіналом і відбитком: метод повної оптимізації процесу (full-process optimized, FPO) та метод корекції оригіналу за допомогою нейронної мережі (neural network aided original adjustment, NNAOA). Ці методи, враховуючи тип задрукованого матеріалу та характеристики друкарського обладнання, забезпечують зменшення показника кольорних відмінностей ( $\Delta E$ ) з 20.8 до 5.254 та залежності від досвіду оператора, забезпечуючи точне кольоровідтворення.

В науковій праці [4] T. Cigula досліджує вплив заміни сірої компоненти (grey component replacement, GCR) та застосування різних лаків на якість друку на

картоні. Встановлено, що GCR не тільки знижує витрати фарб, але й підвищує точність кольоровідтворення у «червоній» частині спектра, при цьому використання УФ-лаку впливає на приріст растрових елементів (TVI), а водні та офсетні лаки мають мінімальний вплив на кольоровідтворення. Ці результати є важливими для оптимізації друку пакувальних матеріалів.

Проблема стійкості матеріалів розглядається у дослідженні Bilge N. Altay та інших авторів [5], в якому запропоновано замінити синтетичний латекс у папері крохмальними наночастинками (NP). Цей підхід забезпечує покращення оптичних властивостей, передачі тонера та збільшення колірного охоплення без втрати стабільності, сприяючи зниженню екологічного впливу поліграфічного виробництва.

Аналіз переваг цифрового струменевого друку порівняно з аналоговими методами у створенні електронних компонентів описаний у дослідженні [6], вказуючи на його високу точність і швидкість.

Аналіз цифрових технологій для друку електронних матеріалів, зокрема струменевого друку з п'єзоелектричним приводом, який є зрілою технологією для виготовлення друкованої електроніки здійснено у дослідженні [7] Kye-Si Kwon та авторів. Здійснено порівняння різних методів прямого друку для кращої в'язкості чорнил та для створення дрібних елементів, серед яких електрогідродинамічний струменевий друк, аерозольний струменевий друк і мікроплоттер. Оцінюються можливості використання цих методів для створення зображень з високою роздільною здатністю і електронних компонентів, зокрема для дисплеїв на рідких кристалах та органічних світлодіодах. Дослідження також розглядає використання металевих наночастинок у чорнилах для друку провідних зразків, що відкриває нові можливості для друкованої електроніки.

У дослідженні Phil Green [8] розглядається важливість характеристик принтерів для досягнення точного кольоровідтворення в цифровому друці. Метою характеристики принтера є створення моделі, яка дозволяє передбачити необхідні параметри для досягнення бажаної колірної палітри на друкованому зображенні. Моделювання може включати різні підходи, такі як моделі на основі щільності барвника і площі растрового елемента, а також числові методи, зокрема регресію. Використання спектральних розширень до моделі Нейгаубера показало хороші результати, а спектральна характеристика здійснювалась через спектральну оцінку. Правильний вибір навчальних даних є критичним для досягнення точного кольоровідтворення.

Автори [9-11] запропонували нову інформаційну технологію, яка побудована на представленні оригінального зображення в новому колірному просторі ICaS. Знайшли точні розв'язки рівнянь синтезу кольорового зображення, що дозволило оптимізувати використання друкарських фарб в офсетному друці. Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення для обробки цифрових оригіналів.

Отже, сучасні дослідження фокусуються на розробці нових методів для підвищення точності кольоровідтворення, оптимізації матеріалів та технологій друку, забезпечуючи екологічність і розширення функціональності цифрового друку. Впровадження таких інноваційних рішень сприятиме подальшому розвитку поліграфічної індустрії.

**Мета статті.** Основною метою дослідження є розробка та впровадження ефективних методів обробки цифрових оригіналів для оптимізації витрат кольорових тонерів і чорнил у цифровому друці, зокрема при підготовці до друку струминними та електрографічними пристроями. Відповідно до мети сформульовані такі завдання:

- дослідити особливості економії кольорових тонерів і чорнил у цифровому друці, враховуючи технічні параметри струминного та електрографічного обладнання;
- проаналізувати можливості адаптації розроблених методів обробки цифрових оригіналів для різних способів цифрового друку;
- оцінити ефективність запропонованих рішень щодо зменшення витрат тонерів і чорнил, а також вплив на якість друкованої продукції.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Дослідження проводились на основі колориметричних вимірювань відбитків, одержаних у виробничих умовах. Друк здійснено на цифрових аркушевих машинах Konica Minolta bizhub PRESS C6000L, Xerox DCP 700, Xerox Versant 80 Press, Epson L1800. На цих пристроях доцільно досліджувати кольоровідтворення через їхню високу якість друку та можливість друкувати на широкому діапазоні матеріалів. Усі пристрої забезпечують високу роздільну здатність, що дозволить проаналізувати градації кольорів і точність відтворення. Xerox і Konica Minolta використовують електрографічну технологію, яка стабільно відтворює кольори. Всі пристрої підтримують роботу з ICC-профілями, що дозволяє досліджувати методи оптимізації кольорів та зниження витрат тонерів або чорнил. На якість відбитків отриманих за допомогою цифрових технологій друку впливає чотири основні фактори: програмне забезпечення, друкуюча система, колірні характеристики тонера/чорнила, тип задрукованого матеріалу.

Для досліджень в якості тестових зображень використано градаційні шкали, які складаються з 169 тестових полів попарного накладання основних тріадних кольорів Голубого (Cyan), Пурпурного (Magenta) та Жовтого (Yellow), а також фотографічне зображення з тестовими полями домінуючих на зображенні кольорів. На рисунку 1 представлено тестові поля градацій тріадних кольорів від 0 до 100% з кроком 5%. Кольори утворені таким співвідношенням фарб знаходяться на межі колірного охоплення досліджуваних умов друку.

Колірні характеристики отриманих кольорових відбитків вимірювали за допомогою спектрофотометра GretagMacbeth Spectrolino, який використовується для контролю якості та управління кольором на всіх етапах поліграфічного процесу. Цей пристрій виконує три основні функції: вимірювання колориметричних і спектральних характеристик моніторів, прозорих і непрозорих матеріалів, а також визначення оптичної щільності непрозорих матеріалів [12]. Для забезпечення автоматизації вимірювань Spectrolino встановлений на координатному столі SpectroScan, що дозволяє проводити точні вимірювання полів колірного охоплення друкарського обладнання у відбитому світлі з передачею даних безпосередньо в комп'ютер.

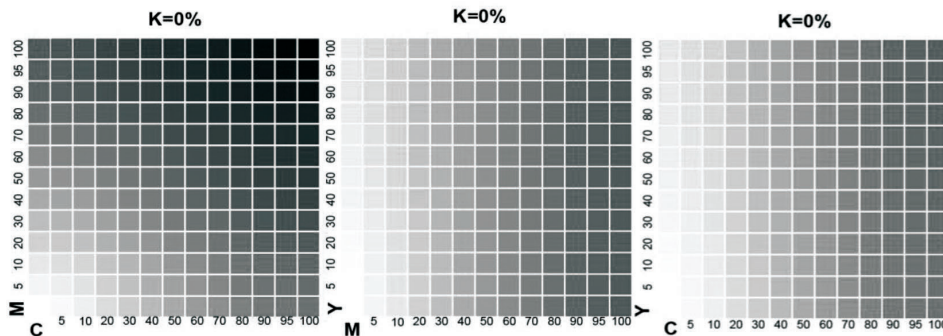


Рис. 1. Тестові поля градацій попарного накладання голубої, пурпурної та жовтої фарб

Залежність між вхідним сигналом оригіналу та вихідним завжди нелінійна. Визначення показника нелінійності друкарського процесу здійснюється на основі градаційних полів тріадних фарб. Показник нелінійності переважно залежить від розтискування растрових елементів та спектральних характеристик фарб [13].

Найвпливовішим фактором, що обумовлює величину розтискування є тип паперу. Чим пористіший папір, тим більшою є його всотувальна здатність і тим більшою буде величина розтискування растрових елементів кожної фарби у процесі друку. Для визначення показника нелінійності необхідно мати координати RGB градаційних полів чистих тріадних фарб.

За допомогою спектрофотометра заміряно координати CIE  $L^*a^*b^*$ , які перераховуються в подальшому в систему XYZ. Для розрахунку використовуються формули:

$$X = x_r \times X_r; \quad Y = y_r \times Y_r; \quad Z = z_r \times Z_r, \quad (1)$$

де  $X_r Y_r Z_r$  – координати білого кольору стандартного джерела випромінювання, для джерела D65:  $X_r=0.9505$ ;  $Y_r=1$ ;  $Z_r=1.0891$ .

Коефіцієнти  $x_r, y_r, z_r$  розраховуються за наступними формулами (2-4):

$$x_r = \begin{cases} f_x^3 & \text{if } f_x^3 > \varepsilon \\ (116f_x - 16) / \kappa & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$y_r = \begin{cases} ((L+16)/116)^3 & \text{if } L > \kappa\varepsilon \\ L / \kappa & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$z_r = \begin{cases} f_z^3 & \text{if } f_z^3 > \varepsilon \\ (116f_z - 16) / \kappa & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$f_x = \frac{a}{500} + f_y; \quad f_z = f_y - \frac{b}{200}; \quad f_y = (L+16)/116, \quad (5)$$

де  $\varepsilon = 0.008856$ ,  $\kappa = 903.3$ .

Для визначення показника нелінійності друкарського процесу для кожного випадку необхідно перейти від координат кольору XYZ до координат RGB простору Adobe RGB (1998).

Для будь-якого робочого RGB-простору, координати кольору XYZ описуються лінійним матричним рівнянням:

$$\begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.0413690 & -0.5649464 & -0.3446944 \\ -0.9692660 & 1.8760108 & 0.0415560 \\ 0.0134474 & -0.1183897 & 1.0154096 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Визначаємо показник нелінійності при відтворенні градаційних шкал тріадних фарб у просторі RGB за описаною методикою [13].

Для однофарбових відбитків друкарського процесу нелінійні рівняння у вигляді степеневих функцій мають вигляд:

$$R = R_C + (R_0 - R_C)(1 - S_C)^{\gamma_C} \quad (7)$$

$$G = G_M + (G_0 - G_M)(1 - S_M)^{\gamma_M} \quad (8)$$

$$B = B_Y + (B_0 - B_Y)(1 - S_Y)^{\gamma_Y}. \quad (9)$$

Для знаходження степеневі функції для визначення показника нелінійності використано програму Origin. За формулами (7-9) побудовано залежності координат RGB відносно величини оберненої до відносної площі растрових елементів друкарських фарб СМУ.

На рисунках 2 а)-б) наведені експериментальні залежності координат R (голуба фарба), G (пурпурна фарба), B (жовта фарба) відносно величини  $(1-S)$  для відбитків отриманих на цифрових машинах Konica Minolta та Xerox.

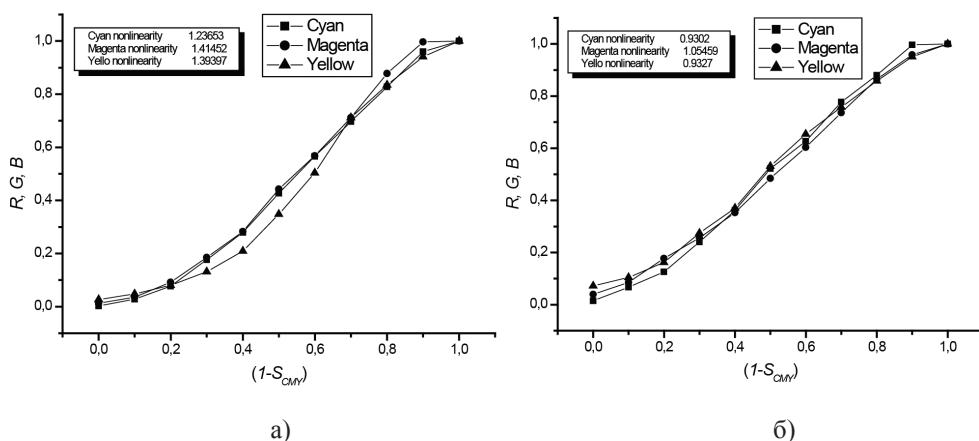


Рис. 2. Нелінійність градаційних полів фарб СМУ віддрукованих на цифрових машинах Konica Minolta C6000L та Xerox DCP 700

Розраховано показники нелінійності кольорових фарб СМУ на основі градаційних полів віддрукованих на цифрових друкарських пристроях. Показники нелінійності відбитків отриманих на цифровій машині Xerox Versant 80 (рис. 3 а) наближені до характеристичних даних FOGRA51 (рис. 3 б), які описують стандартизовані умови відтворення кольорів у офсетному плоскому друці на крейдованому папері.

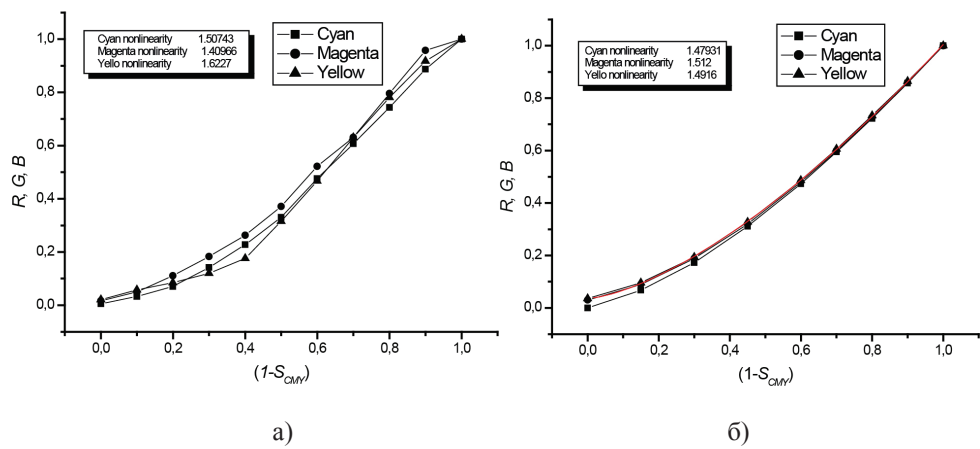


Рис. 3. Нелінійність градаційних полів фарб CMY віддрукованих на цифровій машині Xerox Versant 80 та за даними FOGRA51

Таблиця 1

Показник нелінійності градацій на відбитках друкарських фарб

| Кольорові відбитки фарб | Умови друку           |               |             |                  |         |
|-------------------------|-----------------------|---------------|-------------|------------------|---------|
|                         | Konica Minolta C6000L | Xerox DCP 700 | Epson L1800 | Xerox Versant 80 | FOGRA51 |
| Голубої (Cyan)          | 1.24                  | 0.93          | 1.17        | 1.51             | 1.48    |
| Пурпурної (Magenta)     | 1.42                  | 1.06          | 0.93        | 1.41             | 1.51    |
| Жовтої (Yellow)         | 1.39                  | 0.93          | 1.07        | 1.62             | 1.49    |

Маючи показник нелінійності відбитків друкарських фарб, ми можемо визначити базові вектори їх кольорів. Базові вектори кольорів тріадних фарб та їх попарних накладань необхідні для обчислення рівнянь автотипного синтезу. Розв’язок цих рівнянь для кольорів оригіналу можливий з використанням ортогонального простору ICaS та за умови оптимального співвідношення фарб. Ці умови реалізуються у розробленій технології кольороподілу ICaSColorPrint [10].

Перехід до нового колірного простору ICaS, здійснюється за ортогональним перетворенням Хартлі:

$$\begin{bmatrix} I \\ C \\ S \end{bmatrix} = \hat{\mathbf{H}} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}; \tag{10}$$

$$\hat{\mathbf{H}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \text{cas}(2\pi/3) & \text{cas}(4\pi/3) \\ 1 & \text{cas}(4\pi/3) & \text{cas}(2\pi/3) \end{bmatrix}, \quad \text{cas}(\pi x) = \cos(\pi x) + \sin(\pi x). \tag{11}$$

Для характеристики та кількісної оцінки кольорів цифрового зображення використовуються три нові координати: ахроматична координата  $I$  та дві хроматичні координати  $C$  і  $S$ . Ахроматична координата  $I$  характеризує нейтрально-сірі кольори зображення. Хроматичні координати  $C$  і  $S$  описують для довільно вибраного кольору його характеристики: хроматичність та колірний тон.

Автотипний синтез кольору фарбами СМΥК описується векторним рівнянням:

$$\mathbf{C}_{gen} = S_K^0 \left( S_C^0 \hat{\mathbf{H}}\mathbf{R}_0 + S_M^0 \hat{\mathbf{H}}\mathbf{G}_0 + S_Y^0 \hat{\mathbf{H}}\mathbf{B}_0 + S_M^0 S_Y^0 \hat{\mathbf{H}}\mathbf{C}_0 + S_C^0 S_Y^0 \hat{\mathbf{H}}\mathbf{M}_0 + S_C^0 S_M^0 \hat{\mathbf{H}}\mathbf{Y}_0 + S_C^0 S_M^0 S_Y^0 \hat{\mathbf{H}}\mathbf{K}_0 \right), \quad (12)$$

де  $\mathbf{C}_{gen}$  – вектор кольору в колірному просторі ICaS;

$\hat{\mathbf{H}}\mathbf{C}_0$ ,  $\hat{\mathbf{H}}\mathbf{M}_0$ ,  $\hat{\mathbf{H}}\mathbf{Y}_0$ ,  $\hat{\mathbf{H}}\mathbf{R}_0$ ,  $\hat{\mathbf{H}}\mathbf{G}_0$ ,  $\hat{\mathbf{H}}\mathbf{B}_0$ ,  $\hat{\mathbf{H}}\mathbf{K}_0$  – базові вектори кольорів друкарських фарб, їх попарного та потрійного накладання, в колірному просторі ICaS, розраховані за експериментальними даними з врахуванням показника нелінійності  $\gamma$ .

$S_C^0, S_M^0, S_Y^0, S_K^0$  – обернені величини до відносних площ растрових елементів друкарських фарб СМΥК.

Розраховані значення базових векторів кольорів фарб та їх попарних накладань і показник нелінійності є параметрами налаштування кольороподілу за технологією ICaS-ColorPrint. Здійснено кольороподіл, тобто перетворено в модель СМΥК, за технологією ICaS-ColorPrint тестового кольорового зображення для досліджуваних пристроїв цифрового друку та збережено у форматі файлу Tiff.

Тестове зображення надруковане на досліджуваних пристроях Konica Minolta bizhub PRESS C6000L, Xerox DCP 700, Xerox Versant 80 Press, Epson L1800. Важливо, щоб драйвер пристрою не перерозподілив канали фарб СМΥК, тому було виключено систему керування кольором. Цифрові друкарські машини Xerox DCP 700 та Xerox Versant 80 Press здійснили друк каналів СМΥК без змін, що підтверджено фотографіями, отриманими за допомогою цифрового мікроскопа. На рисунках 5 та 6 наведено знімки відбитків, надрукованих за двома технологіями кольороподілу. За технологією ICaS-ColorPrint сірий колір формується за рахунок чорних та жовтих растрових елементів, тоді як у класичному підході – за рахунок растрових елементів усіх кольорів СМΥК. Метою дослідження було експериментально підтвердити, що цифрові друкарські пристрої здатні забезпечити друк відбитків за розробленою технологією кольороподілу.

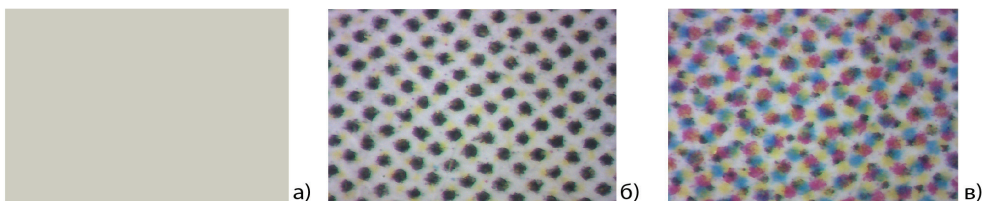


Рис. 4. Сірий колір: а) цифровий оригінал, б) кольороподіл за технологією ICaS-ColorPrint; в) кольороподіл за класичною схемою

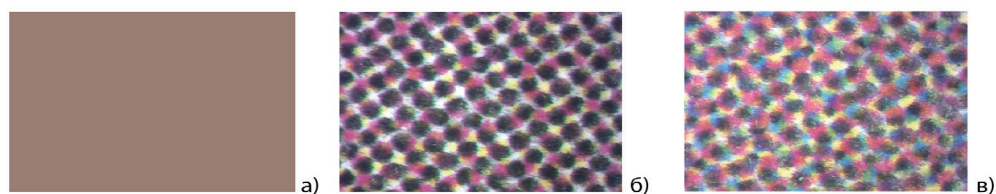


Рис. 5. Коричневий колір: а) цифровий оригінал, б) кольороподіл за технологією ICaS-ColorPrint; в) кольороподіл за класичною схемою

Таблиця 2

## Колірні відмінності та економія фарб

| № зразка | Цифровий оригінал | Відбиток        | $\Delta E$ (CIE 2000) | СМУК за профілем | СМУК оптимізоване | Економія фарб, % |
|----------|-------------------|-----------------|-----------------------|------------------|-------------------|------------------|
|          | $L^*, a^*, b^*$   | $L^*, a^*, b^*$ |                       |                  |                   |                  |
| 1        | 79, -1, 4         | 79, -1, 3       | 0.87                  | 24, 17, 22, 4    | 1, 0, 7, 22       | 55.2             |
| 2        | 53, 7, 8          | 51, 8, 7        | 2.47                  | 35, 41, 40, 26   | 0, 24, 20, 48     | 35.2             |
| 3        | 20, 6, 3          | 21, 9, 2        | 3.27                  | 54, 62, 47, 70   | 0, 40, 22, 84     | 37.3             |
| 4        | 37, 13, 18        | 34, 17, 18      | 3.98                  | 33, 57, 60, 48   | 0, 51, 55, 61     | 15.7             |
| 5        | 68, 32, 43        | 62, 40, 44      | 6.15                  | 4, 52, 65, 1     | 0, 62, 71, 0      | -9               |
| 6        | 48, 40, 33        | 47, 50, 39      | 3.5                   | 13, 71, 69, 20   | 0, 80, 76, 15     | 1.2              |
| 7        | 41, 11, 39        | 36, 15, 35      | 5.83                  | 25, 49, 84, 46   | 0, 46, 92, 56     | 4.9              |
| 8        | 52, 22, 26        | 49, 29, 25      | 5.39                  | 20, 55, 60, 23   | 0, 57, 57, 29     | 9.5              |
| 9        | 32, 10, 17        | 30, 13, 17      | 3.10                  | 38, 56, 62, 56   | 0, 46, 57, 69     | 18.9             |
| 10       | 20, 5, 9          | 21, 7, 9        | 2.39                  | 51, 58, 54, 72   | 0, 37, 44, 85     | 29.4             |
| 11       | 19, 5, 9          | 21, 7, 9        | 2.67                  | 50, 57, 56, 73   | 0, 37, 44, 85     | 29.7             |
| 12       | 42, 6, 29         | 39, 7, 29       | 2.78                  | 31, 42, 72, 45   | 0, 31, 69, 60     | 15.8             |
| 13       | 27, 6, 13         | 27, 8, 13       | 2.19                  | 44, 54, 60, 64   | 0, 36, 51, 78     | 26               |
| 14       | 44, 26, 33        | 42, 32, 34      | 3.63                  | 19, 62, 72, 32   | 0, 67, 76, 36     | 3                |
| 15       | 30, 3, -2         | 32, 4, -4       | 2.54                  | 28, 55, 69, 46   | 3, 17, 0, 78      | 50.5             |

Досліджено особливості застосування технології кольороподілу ICaS-ColorPrint у цифровому друці. Для струменевих принтерів із набором чорнил CMYK+ Light Cyan, Light Magenta така можливість відсутня. Багатофункційний пристрій Konica Minolta C6000L використовує власні налаштування поділу каналів CMYK. Натомість цифрові друкарські машини Xerox придатні для впровадження та випробування технології ICaS-ColorPrint, яка базується на аналітичних розв'язках рівнянь автотипного синтезу. Алгоритми цієї технології враховують особливості відтворення кольорів у конкретній друкарській системі через визначений показник нелінійності та базові вектори кольорів фарб (тонерів). А також забезпечують значну економію фарб і тонерів завдяки умові оптимального співвідношення фарб.

Здійснено оцінювання ефективності застосування технології зменшення витрат тонерів і чорнил, а також її впливу на якість друкованої продукції. Середнє значення колірних відмінностей між відбитком та оригіналом становить 3.38 одиниць  $\Delta E$  (CIE 2000), максимальне значення – 6.15, а мінімальне – 0.87. Економія фарб у середньому досягає 21,5%, а її максимальне значення перевищує 50% від стандартного використання фарб для відтворення кольору на відбитку.

Попри економію фарб, середнє значення колірних відмінностей є прийнятним для більшості практичних застосувань. Проте максимальні значення можуть бути критичними для друкованої продукції, що вимагає високої точності кольоропередачі. Максимальні значення колірних відмінностей свідчать про необхідність додаткової оптимізації алгоритмів для покращення точності кольоропередачі у вимогливих завданнях.

**Висновки.** Оптимізація витрат чорнил і тонерів у цифровому друці є перспективним напрямом, що дозволяє досягти значної економії ресурсів без суттєвого зниження якості продукції. Запропонована технологія ICaS-ColorPrint демонструє економію фарб на рівні 21,5%, а в окремих випадках – понад 50%. Середнє значення колірних відмінностей між оригіналом і відбитком 3.38  $\Delta E$  (CIE 2000) є прийнятними для більшості практичних застосувань, хоча максимальні значення (6.15  $\Delta E$ ) свідчать про необхідність додаткової оптимізації алгоритмів для задач, що вимагають високої точності кольоропередачі.

Дослідження растрової структури відбитків під мікроскопом підтвердили, що цифрові друкарські машини Xerox DCP 700 та Xerox Versant 80 Press повністю сумісні із впровадженням інновацій ICaS-ColorPrint. Натомість струменеві принтери з розширеним набором чорнил виявляють технологічні обмеження у використанні цього підходу. Висока відповідність характеристик друку умовам, стандартизованим FOGRA51, демонструє конкурентний потенціал цифрового друку у сучасних виробничих процесах.

Результати досліджень свідчать про можливість поєднання економічності, екологічності та якості в сучасних поліграфічних процесах, що сприятиме подальшому розвитку галузі через впровадження таких технологій у виробничі цикли.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Smithers report identifies growth segments and technologies for \$136.7 billion digital printing market across the next decade. URL: <https://www.smithers.com/en-gb/resources/2022/april/smithers-identifies-growth-areas-for-digital-print> (дата звернення: 20.11.2024).
2. The Future of Global Printing to 2028. URL: <https://www.smithers.com/services/market-reports/printing/the-future-of-global-printing-to-2028> (дата звернення: 20.11.2024).
3. Li Yu., Zhang L., Zhang R., Li R. Study of color reproduction in pigment digital printing. *Textile Research Journal*. 2023. Vol. 93. Iss. 11–12. <https://doi.org/10.1177/00405175221147725>.
4. Cigula T., Hudika T., Donevski D. Color reproduction on varnished cardboard packaging by using lower ink coverages due to the gray component replacement image processing. *Color Research & Application*. 2022. Vol. 47. No. 1. P. 172–181.
5. Altay B. N., Carver-Kubik A., Williams S., Huq A., Sugiyama M., Dhote Y., Zunjarrao A., Aydemir C., Karademir A. Starch-based nanoparticles as a replacement for synthetic latex: A comprehensive assessment of printability and colorimetric characteristics. *Color Research & Application*. 2024. Vol. 49. No. 6. P. 538–552.
6. Rohland T., Sauva S., Schinke J., Kaiser C. Comparison of analog and digital printing specifically for printed electronics. In: Zapka W. (ed.) *Inkjet Printing in Industry: Materials, Technologies, Systems, and Applications*. 2022. Vol. 1. Chapter 52. <https://doi.org/10.1002/9783527828074.ch52>.
7. Kwon K.-S., Rahman M. K., Phung T. H., Hoath S. D., Jeong S., Kim J. S. Review of digital printing technologies for electronic materials. *Flexible and Printed Electronics*. 2020. Vol. 5, No. 4. P. 53.
8. Green P. Characterizing Hard Copy Printers. In: P. Green, ed. *Fundamentals and Applications of Colour Engineering*. 2023. Chapter 7. <https://doi.org/10.1002/9781119827214.ch7>.
9. Семенів М. Р., Семенів В. В., Плахтина З. І. Аналіз програмного забезпечення для оптимізації використання кольорових фарб. *Квалілогія книги*. 2021. №1 (39). С. 89–97.
10. Shovheniuk M., Kovalskiy B., Semeniv M., Semeniv V., Zanko N. Information Technology of Digital Images Processing with Saving of Material Resources. *Proceedings of the 15th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer*. Volume I: Main Conference. Kherson, Ukraine, June 12–15, 2019. P. 414–419. <http://ceur-ws.org/Vol-2387/20190414.pdf> (Scopus) ISSN 1613-0073.
11. Kovalskiy B., Semeniv M., Zanko N., Semeniv V. Application of digital images processing for expanded gamut printing with effect of saving material resources. *CEUR Workshop Proceedings*. – 2024. Vol. 3702 : Proceedings of the 7th International workshop on computer modeling and intelligent systems (CMIS-2024), Zaporizhzhia, Ukraine, May 3, 2024. P. 226–238.
12. Chromaxion. Color information that measures up. GretagMacbeth Spectrolino. URL: <https://www.chromaxion.com/information/spectrolino.html> (дата звернення: 20.11.2024).
13. Занько Н. В., Писанчин Н. С., Голубник Т. С., Маїк Л. Я., Ковальський Б. М. Колориметричні методи контролю якості кольоровідтворення в поліграфії. У В.П. Ткаченко, О. В. Вовк, І. Б. Чеботарьова (Ред.), *Поліграфічні, мультимедійні та web-технології: колективна монографія* (С. 37–60). Харків: ТОВ «Друкарня Мадрид».

## REFERENCES

1. Smithers. (2022). Smithers report identifies growth segments and technologies for \$136.7 billion digital printing market across the next decade. Retrieved November 20, 2024, from <https://www.smithers.com/en-gb/resources/2022/april/smithers-identifies-growth-areas-for-digital-print>.
2. Smithers. (n.d.). The Future of Global Printing to 2028. Retrieved November 20, 2024, from <https://www.smithers.com/services/market-reports/printing/the-future-of-global-printing-to-2028>.
3. Li, Y., Zhang, L., Zhang, R., & Li, R. (2023). Study of color reproduction in pigment digital printing. *Textile Research Journal*, 93(11-12). <https://doi.org/10.1177/00405175221147725>.
4. Cigula, T., Hudika, T., & Donevski, D. (2022). Color reproduction on varnished cardboard packaging by using lower ink coverages due to the gray component replacement image processing. *Color Research & Application*, 47(1), 172–181.
5. Altay, B. N., Carver-Kubik, A., Williams, S., Huq, A., Sugiyama, M., Dhote, Y., ... Karademir, A. (2024). Starch-based nanoparticles as a replacement for synthetic latex: A comprehensive assessment of printability and colorimetric characteristics. *Color Research & Application*, 49(6), 538–552.
6. Rohland, T., Sauva, S., Schinke, J., & Kaiser, C. (2022). Comparison of analog and digital printing specifically for printed electronics. In W. Zapka (Ed.), *Inkjet Printing in Industry: Materials, Technologies, Systems, and Applications* (Vol. 1, Chapter 52). <https://doi.org/10.1002/9783527828074.ch52>.
7. Kwon, K.-S., Rahman, M. K., Phung, T. H., Hoath, S. D., Jeong, S., & Kim, J. S. (2020). Review of digital printing technologies for electronic materials. *Flexible and Printed Electronics*, 5(4), 53.
8. Green, P. (2023). Characterizing hard copy printers. In P. Green (Ed.), *Fundamentals and Applications of Colour Engineering* (Chapter 7). <https://doi.org/10.1002/9781119827214.ch7>.
9. Semeniv, M. R., Semeniv, V. V., & Plakhtyna, Z. I. (2021). Analiz prohramnoho zabezpechennia dlia optymizatsii vykorystannia kolorovykh farb. *Kvalilohiia knyhy*, 1(39), 89–97. (in Ukrainian).
10. Shovheniuk, M., Kovalskiy, B., Semeniv, V., Semeniv, M., & Zanko, N. (2019). Information technology of digital images processing with saving of material resources. In *Proceedings of the 15th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer* (Vol. 1, pp. 414–419). Kherson, Ukraine. Retrieved from <http://ceur-ws.org/Vol-2387/20190414.pdf>.
11. Kovalskiy, B., Semeniv, M., Zanko, N., & Semeniv, V. (2024). Application of digital images processing for expanded gamut printing with effect of saving material resources. *CEUR Workshop Proceedings*, 3702, 226–238.
12. Chromaxion. Color information that measures up. (n.d.) GretagMacbeth Spectrolino. Retrieved from <https://www.chromaxion.com/information/spectrolino.html>.
13. Zanko, N. V., Pysanchyn, N. S., Holubnyk, T. S., Maik, L. Ya., & Kovalskiy, B. M. (2023). Kolorymetrychni metody kontroliu yakosti kolorovidtvorennia v polihrafii. In V. P. Tkachenko, O. V. Vovk, & I. B. Chebotarova (Eds.), *Polihrafichni, multymediini ta web-tekhnologii: kolektyvna monohrafia* (37–60). Kharkiv: TOV «Drukarnia Madryd». (in Ukrainian).

doi: 10.32403/0554-4866-2024-2-88-19-31

## APPLICATION OF INK OPTIMIZATION TECHNOLOGY IN DIGITAL PRINTING

M. R. Semeniv<sup>1</sup>, V. V. Semeniv<sup>2</sup>, N. S. Snihur<sup>2</sup>, M. T. Vonsovykh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Lviv National Polytechnic University,  
28, S. Bandery, St., Lviv, 79013, Ukraine  
mariia.r.semeniv@lpnu.ua*

<sup>2</sup>*Ukrainian Academy of Printing,  
19, Pid Holoskom, St., Lviv, 79020, Ukraine*

*Optimizing ink and toner consumption in digital printing is a complex challenge involving economic, technological, and environmental factors. Advances in color management algorithms and innovative techniques for processing digital originals not only lower costs but also ensure consistent, high-quality print results. Current research focuses on improving color reproduction accuracy, optimizing materials and technologies, enhancing environmental sustainability, and expanding the functionality of digital printing systems. This study examines the use of ICaS-ColorPrint technology to optimize ink and toner usage in digital printing. Experiments were conducted with inkjet and electrographic printing devices from Xerox, Konica Minolta, and Epson. The research introduces a color conversion method to identify primary ink color vectors and determine the nonlinearity index. It demonstrates the importance of using the ICaS orthogonal color space when solving autotype synthesis equations. Colorimetric measurements of prints revealed nonlinearity indices for the analyzed printing conditions, which closely match FOGRA51 standards for offset printing on coated paper, particularly in outputs from the Xerox Versant 80 digital press. The study also investigates how the developed methods for processing digital originals can be adapted to different digital printing platforms, assessing their resource-saving potential and print quality. The results confirm that ICaS-ColorPrint technology effectively reduces costs, improves environmental sustainability, and ensures stable print quality. This technology shows great potential for integration into industrial-scale printing, enabling more sustainable and cost-efficient production processes. Moreover, these findings pave the way for future developments in color management systems, making them more adaptable to evolving printing technologies and market demands.*

**Keywords:** color separation, digital printing, autotype synthesis, optimization of ink consumption, color differences.

*Стаття надійшла до редакції 21.06.2024.*

*Received 21.06.2024.*