

МОДЕЛЮВАННЯ ГІБРИДНИХ МЕТРИК ЯКОСТІ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ДЕГРАДАЦІЇ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ РЕЄСТРОВАНОЇ ФОТОСЦЕНИ

А. Є. Липовий¹

1. Національний університет «Львівська Політехніка», вул. Степана Бандери, 12, Львів, 79013, Україна. <https://orcid.org/0009-0009-2891-3139> e-mail: arsen.y.lipovyi@lpnu.ua

Досліджена проблема об'єктивного оцінювання якості цифрових зображень на етапі додрукарської підготовки. Акцент робиться на зміні традиційної парадигми: еталоном якості виступає не фізичний відбиток, який завжди має технологічні похибки, а ідеальна реєстрована сцена, візуальну та інформаційну цілісність якої необхідно зберегти під час перенесення на матеріальний носій. Традиційні екранні метрики оцінювання, такі як PSNR та SSIM, працюють в ідеалізованому цифровому середовищі й не враховують особливості субтрактивного синтезу кольору. Для вирішення проблеми запропоновано інформаційну технологію на базі гібридної предиктивної метрики якості, яка функціонує як алгоритмічна цифрова кольоропроба. Алгоритм використовує математичне моделювання механічного та оптичного природу тонового значення. Впровадження даної системи дозволяє інтелектуально коригувати фотосцену, запобігати технологічному браку та сприяти сталості поліграфічного виробництва.

Ключові слова: реєстрована фотосцена, інформаційні технології, предиктивна метрика, додрукарська підготовка, математичне моделювання, цифрова кольоропроба.

Постановка проблеми. Еволюція поліграфічної індустрії та систем додрукарської підготовки характеризується стрімким впровадженням новітніх інформаційних технологій. Багато з показників якості поліграфічної репродукції закладаються саме на додрукарському етапі опрацювання інформаційного змісту образотворчих оригіналів. У центрі цієї трансформації знаходиться фундаментальна зміна парадигми: сьогодні метою систем додрукарської підготовки є не просто спроба отримати ідеальний фізичний відбиток (який завжди матиме технологічні обмеження матеріалів та обладнання), а інтелектуальне підвищення якості та максимальне збереження властивостей ідеальної реєстрованої фотосцени (цифрового оригіналу) при її перенесенні на фізичний носій.

Сучасні спроби автоматизувати цей контроль стикаються з технологічним бар'єром. Найпопулярніші метрики оцінки якості цифрових зображень, які лежать в основі систем комп'ютерного зору, оцінюють реєстровану фотосцену виключно для екрана. Такі алгоритми, як PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) або SSIM (Structural Similarity Index), оперують в адитивній колірній моделі і абсолютно

не враховують взаємодію фарби з папером. Вони не здатні розпізнати, як ідеальна цифрова фотосцена деградує через перевищення сумарного покриття фарбою (Total Ink Limit), не розуміють концепції балансу сірого і не передбачають розтискування растрової точки. Відповідно, ідеальна з точки зору класичних алгоритмів реєстрована фотосцена може зазнати незворотних спотворень під час реального друку, де фарби зіллються у суцільну брудну пляму. Таким чином, виникає гостра потреба у розробці інформаційних технологій та предиктивних метрик, які б оцінювали саме рівень збереження цілісності реєстрованої фотосцени та дозволяли її інтелектуально покращувати до виведення на друк.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблематика оцінки якості цифрових зображень та моделювання поліграфічних процесів активно досліджується як вітчизняними, так і закордонними вченими. Питання використання віртуальних метрик для оцінки якості кольорових зображень у поліграфії розглядалися в працях В. П. Ткаченка та А. С. Гордєєва [1], а методики оцінювання цифрових півтонових зображень досліджувалися науковцями Української академії друкарства М. М. Дубневич, З. М. Сельменською та О.Г. Хамулою [2, 3]. Дослідження математичного моделювання розтискування растрової точки, зокрема застосування методу найменших квадратів (LSM), детально висвітлені у роботах X. Liu та співавтори [4]. Крім того, сучасні тенденції впровадження нейромереж для прогнозування якості друку представлені в дослідженнях Н. Shen [5], який запропонував метрику FFSSF, та Tian D. та співавтори [6], що досліджували спектральне прогнозування на базі рівнянь Нойгебауера. Попри значну кількість досліджень, залишається невирішеним завдання комплексної інтеграції цих параметрів у єдиний алгоритм, який би функціонував як повноцінна предиктивна цифрова кольоропроба.

Мета роботи. Розробка та наукове обґрунтування концепції гібридної предиктивної метрики якості оцінки цифрових зображень. Запропонований алгоритм має математично симулювати процес просторового растрування та друку для виявлення деградації цифрового оригіналу, що дозволить системі інтелектуально сигналізувати про потенційний брак та коригувати фотосцену ще до етапу виведення друкарських форм.

Виклад основного матеріалу дослідження. Традиційно індустрія комп'ютерних наук спирається на метрики з повним еталоном (Full-Reference). Домінуючими стандартами у цій сфері є PSNR та SSIM, проте їхня архітектура робить їх непридатними для завдань додрукарської підготовки [7]. Метрика PSNR базується на обчисленні середньоквадратичної помилки (MSE) між двома зображеннями. У контексті поліграфічного відтворення PSNR виявляє критичні недоліки, пов'язані з повною відсутністю кореляції з особливостями людського зору та фізикою друку. Введення в зображення височастотного шуму спричиняє різке падіння значень PSNR, проте під час растрування (halftoning) такі шумові флуктуації маскуються структурою растрових точок. Водночас PSNR може демонструвати парадоксальну сліпоту до мінімальних зсувів колірного тону, що в поліграфії вважається абсолютним браком. Індекс структурної подібності (SSIM) краще імітує роботу людської зорової системи, розкладаючи аналіз на компоненти яскравості, контрастності та структури. Незважаючи на ці переваги, SSIM також виявляється непродуктивним

у ролі предиктивної метрики. Алгоритм може оцінити зображення з ідеальним збереженням структури об'єктів, але з абсолютно спотвореним колірним тоном (наприклад, зелене обличчя замість тілесного), високим балом. Жодна з цих метрик не здатна оцінити, чи утвориться брудна пляма через перевищення лімітів перекриття фарб.

Для наочності розбіжностей між існуючими підходами та необхідними для поліграфії параметрами наведено порівняльний аналіз (табл. 1).

Таблиця 1

Характеристика алгоритму	PSNR	SSIM	Гібридна предиктивна метрика
Базовий підхід	Обчислення абсолютної MSE	Аналіз кореляції структури та дисперсії контрасту	Моделювання розтискування та спектральний аналіз
Оцінка колориметричних зсувів	Дуже низька точність	Низька точність	Висока точність
Чутливість до мікрошумів	Гіперчутлива	Помірна	Адаптивна
Розрахунок покриття (TIL)	—	—	Базовий критерій

Щоб алгоритм зміг коректно оцінити якість майбутнього відбитка, він повинен симулювати процес растрування та розтискування растрової точки (Dot Gain). Гібридна метрика повинна розраховувати дві складові цього процесу: механічну та оптичну. Механічне розтискування має нелінійну природу, досягаючи максимуму в середніх тонах (40%–60%). Сучасні алгоритми використовують метод найменших квадратів (LSM) для створення поліноміальної кривої на основі емпіричних даних та метод трансформації координат для генерування мапи фактичних розмірів точок. Оптичне розтискування виникає через розсіювання світла в товщі паперу. Предиктивна метрика застосовує фізично детермінований підхід, заснований на функції розсіювання точки (PSF) субстрату. Відбиття світла $r(x, y)$ обчислюється через інтеграл згортки:

$$r(x, y) = \{[i_{in}(x, y) \times t(x, y)] * h(x, y)\} \times t(x, y) \quad (1)$$

У цій моделі $i_{in}(x, y)$ – вхідна інтенсивність світла, $r(x, y)$ – коефіцієнт пропускання світла через шар фарби, а $h(x, y)$ – нормалізована функція розсіювання точки паперу. Після розрахунку інтенсивності алгоритм переводить її у значення оптичної щільності:

$$D_r = -\log\left(\frac{r(x, y)}{i_{in}(x, y)}\right) \quad (2)$$

Найбільш небезпечною помилкою є порушення лімітів нанесення фарби – Total Ink Limit (TIL). Теоретичний максимум субтрактивного синтезу становить 400%, проте на практиці ліміт для аркушевого офсету становить 300%–340%, а

для рулонного — 280%–300%. Перевищення TIL провокує проблему трепінгу, що призводить до утворення тьмяної брудної плями в тінях, відмарювання та налипання фарби на офсетне полотно. Предиктивний алгоритм використовує ICC-профіль друкарського процесу, розраховує симульований приріст тону і підсумовує канали: $C_{sim} + M_{sim} + Y_{sim} + K_{sim}$. Результатом є генерація теплової карти (TIL Heatmap) ризикових зон.

Другою фундаментальною проблемою екранних метрик є нечутливість до колориметричних відхилень у нейтральних тонах. Відповідно до стандарту ISO 12647-2, нейтральний сірий колір формується за рахунок домінування блакитної фарби (наприклад, C 50%, M 40%, Y 40%). Формула ідеального балансу сірого враховує візуальну адаптацію ока до кольору субстрату:

$$L_{cmy}^* = L_{paper}^* \times 0.85 \quad (3)$$

Алгоритм піддає нейтральні пікселі індивідуальній симуляції розтискування для кожного каналу. Якщо крива пурпурової фарби виявиться крутішою за криву блакитної, алгоритм прогнозує зсув балансу сірого (hue shift) і обчислює колірну різницю за формулою CIEDE2000. При відхиленні $\Delta E > 2$ система сигналізує про брак. Комплексна архітектура гібридного критерію об'єднує спектральне прогнозування на базі рівнянь Нойгебауера (розширення до 16 первинних кольорів), метод головних компонентів (PCA) та глибокі нейронні мережі (DNN), що оптимізуються алгоритмом IWOA.

Висновки. Застосування стандартних метрик якості цифрових зображень, таких як PSNR або SSIM, у поліграфічному середовищі є системною помилкою через їхню алгоритмічну сліпоту до фізики друку. Розробка предиктивної метрики якості, яка діє як алгоритмічна цифрова кольоропроба, стає критично необхідним кроком. Поєднання спектрального моделювання, нейромережевого аналізу та просторової симуляції механічного і оптичного розтискування створює надійну віртуальну копію відбитка. Впровадження цієї системи дозволяє відмовитися від дороговартісного процесу створення фізичних кольоропроб, знижуючи виробничі витрати та мінімізуючи екологічний слід виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ткаченко В. П., Гордєєв А. С. Використання віртуальних метрик для оцінки якості кольорових зображень. Поліграфія і видавнича справа. 2023. 1(85), С. 65-72. DOI: 10.32403/0554-4866-2023-1-85-65-72.
2. Дубневич М. М., Сельменська З. М. Розробка методики оцінювання показників якості цифрових півтонових зображень. Поліграфія і видавнича справа. 2025. Т. 1, № 89. С. 223–238. DOI: 10.30837/PMW. 2025. T1.223.
3. Дрімайло М. М., Хамула О. Г. Фактори, що впливають на якість друку з форм художнього глибокого друку для естампних технік. Поліграфія і видавнича справа. 2023. № 2 (86). С. 154–162. DOI: 10.32403/0554-4866-2023-2-86-154-162.
4. Liu X., Qiu B., Ling Y.-L. Mathematical modeling and compensation strategies for printing dot gain. PLOS ONE. 2025. Vol. 20. P. e0334921. DOI: 10.1371/journal.pone.0334921.

5. Shen H., Li Y., Zhang X., Wang L. Research on a Multidimensional Digital Printing Image Quality Evaluation Method Based on MLP Neural Network Regression. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 14. P. 5986. DOI: 10.3390/app14145986.

6. Tian D, Ge J and Su N. A hybrid spectral prediction model for printed images based on whale-optimized deep neural network. *Front. Phys.* 12:1429621. DOI: 10.3389/fphy.2024.1429621.

7. Липовий, А. Алгоритми покращення якості зображення за допомогою глибоких нейронних мереж: порівняльний аналіз сучасних методів. *Measuring and Computing devices in technological processes*, 2024, 82(2), 267–270. DOI: 10.31891/2219-9365-2025-82-37.

REFERENCES

1. Tkachenko, V. P., & Gordieiev, A. S. (2022). Vykorystannia virtualnykh metryk dlia otsinky yakosti kolorovykh zobrazhen. *Polihrafiia i vydavnycha sprava*, 2(84), 65-72. DOI: 10.32403/0554-4866-2023-1-85-65-72.

2. Dubnevych, M. M., & Selmenska, Z. M. (2025). Rozrobka metodyky otsiniuvannia pokaznykiv yakosti tsyfrovyykh pivtonovykh zobrazhen. *Polihrafiia i vydavnycha sprava*, 1(89), 223-230. DOI: 10.30837/PMW. 2025. T1.223.

3. Drimaylo, M. M., & Khamula, O. H. (2023). Faktory, shcho vplyvaiut na yakist druku z form khudozhnoho hlybokoho druku dlia estampnykh tekhnik. *Polihrafiia i vydavnycha sprava*, 2(86), 154-162. DOI: 10.32403/0554-4866-2023-2-86-154-162.

4. Liu, X., Qiu, B., & Ling, Y.-L. (2025). Mathematical modeling and compensation strategies for printing dot gain. *PLOS ONE*, 20, e0334921. DOI: 10.1371/journal.pone.0334921.

5. Shen, H., Li, Y., Zhang, X., & Wang, L. (2024). Research on a Multidimensional Digital Printing Image Quality Evaluation Method Based on MLP Neural Network Regression. *Applied Sciences*, 14(14), 5986. DOI: 10.3390/app14145986.

6. Tian D, Ge J, and Su N (2024). A hybrid spectral prediction model for printed images based on whale-optimized deep neural network. *Front. Phys.* 12:1429621. DOI: 10.3389/fphy.2024.1429621.

7. Lypovyi, A. (2025). Alhorytmy pokrashchennia yakosti zobrazhennia za dopomohoiu hlybynnykh neironnykh merezh: porivnialnyi analiz suchasnykh metodiv. *Measuring and computing devices in technological processes*, 82(2), 267–270. DOI: 10.31891/2219-9365-2025-82-37

doi: 10.32403/0554-4866-2026-1-91-138-143

MODELING HYBRID QUALITY METRICS FOR DETECTING DEGRADATION IN DIGITAL IMAGES OF A RECORDED SCENE

A.Y. Lypovyi¹

1. Lviv Polytechnic National University, 12 Stepan Bandera St., Lviv, 79013, Ukraine.
<https://orcid.org/0009-0009-2891-3139> e-mail: arsen.y.lypovyi@lpnu.ua

The article investigates the problem of objective assessment and intelligent quality improvement of a registered photo scene at the prepress stage of printing production. The emphasis is on a fundamental paradigm shift: the absolute benchmark of quality is no longer a physical print, which always has inherent technological limitations and material constraints, but rather the perfect, registered digital photo scene itself. The primary goal of modern prepress systems is to preserve the visual and informational integrity of this digital ideal during its complex transfer to a physical medium. Traditional screen-based image quality assessment (IQA) metrics, such as Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) and Structural Similarity Index (SSIM), operate strictly within an idealized digital environment based on the additive RGB color model. Consequently, they fail to account for the physical and chemical features of subtractive CMYK color synthesis. They completely ignore critical printing factors such as mechanical and optical halftone dot gain, Total Ink Limit (TIL), and Gray Balance. As a result, a registered photo scene that receives high scores from classical algorithms on a monitor may suffer severe degradation during actual printing, leading to ink trapping, set-off, and fatal color shifts. To solve this problem, a novel information technology based on a hybrid predictive quality metric is proposed, functioning as an algorithmic digital color proof. The algorithm uses mathematical modeling of the increase in mechanical and optical tone values based on polynomial functions and the Point Spread Function (PSF) of the paper substrate. The implementation of such a predictive metric in automated preflight systems ensures significant resource savings, intelligent correction of the registered photo scene, and promotes the environmental sustainability of modern printing production.

Keywords: registered photo scene, information technologies, predictive metric, prepress, mathematical modeling, digital color proofing.

Стаття надійшла до редакції 20.03.2026.

Received 20.03.2026.

Стаття прийнята 20.05.2026.

Accepted 20.05.2026

Опубліковано 30.05.2026.

Published 30.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons CC-BY 4.0
© А. Є. Липовий