

УДК 004.93

СИНТЕЗ КОЛОРИМЕТРИЧНИХ ДАНИХ ПРОФІЛЬОВАЛЬНИХ LUT СТРУМЕНЕВИХ ДРУКАРСЬКИХ СИСТЕМ

Р. С. Тиндик

Національний університет «Львівська політехніка»
79020, м. Львів, вул. Під Голоском, 19
e-mail: tindikr@gmail.com

У статті досліджено проблему міжпристроєвої колориметричної узгодженості у широкоформатному струменевому друці за умов паралельної експлуатації екосольвентних та сольвентних систем. Попри використання стандартних процедур ICC-профілювання, єдиної моделі СМУК та однакових носіїв, фізичні відмінності у механізмах формування зображення зумовлюють систематичні розбіжності координат простору CIELab. Унаслідок цього навіть коректно побудовані індивідуальні профілі не гарантують узгодженого кольоровідтворення, а середня міжпристроєва різниця ΔE перевищує допустимі значення, особливо у світлих тонах і глибоких тінях. Метою роботи є розроблення обчислювальної моделі адаптивного узгодження таблиць перетворення (LUT), отриманих під час спектрофотометричного профілювання екосольвентних і сольвентних широкоформатних систем, для формування синтезованого колориметричного масиву та створення узгодженого ICC-профілю з мінімізованою ΔE . Запропонований підхід ґрунтується не на механічному усередненні даних, а на керуваному векторному синтезі координат CIELab з урахуванням просторової неоднорідності похибок. Модель передбачає попарний аналіз вузлів, розрахунок ΔE та застосування адаптивної нелінійної вагової функції $W(T)$, що залежить від сумарного фарбового покриття. Реалізація моделі у вигляді програмного алгоритму дозволяє автоматизувати аналіз і синтез LUT-таблиць та сформувану узгоджену основу для побудови єдиного ICC-профілю, підвищуючи стабільність і прогнозованість кольоровідтворення у широкоформатному виробництві.

Ключові слова: широкоформатний друк, сольвентний друк, ЕКОсольвентний друк, кольоропрофілювання, тестові таблиці (LUT), спектрофотометричні дані, колориметрична модель, ICC-профайл, друкарські технології, колірний простір CIELab, різниця ΔE , колірна модель СМУК, алгоритмічна модель.

Постановка проблеми. У практиці сучасного широкоформатного друку поліграфічні підприємства експлуатують декілька друкарських систем різної фізичної природи, зокрема сольвентні та екосольвентні комплекси в межах єдиного виробничого циклу. Попри використання стандартних процедур кольоропрофілювання, тестових таблиць та спектрофотометричного контролю, кожна система формує власну колориметричну модель через відмінності у мікрогеометрії краплі,

механізмах фіксації пігменту та характері взаємодії чорнила з носієм. У результаті навіть за коректно побудованих індивідуальних ІСС-профілів міжпристроєва різниця ΔE залишається статистично значущою та має нерівномірний розподіл у просторі CIELab, особливо у світлих тонах і глибоких тінях. Це ускладнює відтворення корпоративних кольорів, повторюваність накладів та масштабування замовлень між різними машинами [1].

Наявні підходи - ізольоване профілювання або просте усереднення таблиць перетворення (LUT)- не забезпечують адаптивного узгодження, оскільки не враховують структурну неоднорідність спектрофотометричних даних. Таким чином, постає задача розроблення обчислювальної моделі адаптивного узгодження LUT-таблиць, що дозволить сформувати синтезований колориметричний масив із мінімізованою міжпристроєвою похибкою.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Серед досліджуваних джерел, авторів, такі як Г. В. Фолеа, М. Абільдгаард, Н. В. Занько, Б. М. Канєвський, Б. М. Ковальський, пропонують широкий спектр підходів до аналізу якості друку, кольоровідтворення та технологій управління і корегування кольору у видавничо-поліграфічній галузі.

Метою статті є розроблення обчислювальної моделі адаптивного узгодження таблиць перетворення(LUT), отриманих на етапі спектрофотометричного зняття показників профілювання, екосольвентних та сольвентних широкоформатних друкарських систем, що забезпечить формування синтезованого колориметричного масиву даних та створення узгодженого ІСС-кольоропрофілю з мінімізованою міжпристроєвою різницею ΔE .

Вклад основного матеріалу. У сучасних технологічних комплексах широкоформатного струменевого друку доволі розповсюдженою являється одночасна експлуатація двох основних типів технології, екосольвентних та сольвентних друкувальних машин. Одною з основних вимог до парку обладнання являється точна кольоропередача первинного зображення, а також відповідність у кольоровідтворенні на обох типах обладнання, що своєю чергою формує складну задачу міжпристроєвої колориметричної узгодженості. Попри застосування єдиної колірної моделі СМУК та використання ідентичних, фізичні механізми формування друкованого зображення істотно відрізняються, що зумовлює систематичну різницю у координатах апаратно - незалежної колірної моделі CIELab, отриманих під час спектрофотометричного зняття показників профілювання [2].

Міжпристроєва розбіжність формується під впливом кількох ключових факторів. Одним з яких являється, варіативність мікрогеометрії краплі та різні об'єми чорнильних мас які визначають характер розтікання пігменту та глибину його проникнення в структуру матеріалу. Не менш важливими є фізико-хімічні особливості розчинників які впливають на механізм фіксації барвника, сольвентні чорнила частково модифікують поверхневий шар матеріалу, забезпечуючи глибшу дифузію, тоді як екосольвентні формують переважно поверхневу адсорбційну плівку. Також спектральні характеристики пігментів та різниця у світлопоглинальній здатності призводять до різних показникових результатів у просторі CIELab, з урахуванням ідентичних значень колірних параметрів СМУК.

Стандартна процедура побудови колірної профілю передбачає зняття спектрофотометричних показників із тестових таблиць (color target), та формування таблиць перетворення (LUT), що описують відповідність між вхідними значеннями СМУК і вимірними координатами CIELab. Проте ізольоване профілювання кожної системи не забезпечує взаємного узгодження отриманих таблиць перетворення, оскільки вони відображають різні фізичні моделі формування кольору [3].

Таким чином, виникає необхідність у побудові обчислювальної моделі, яка дозволяє виконати адаптивне узгодження профілювальних LUT-таблиць двох друкарських систем та сформувати синтезований колориметричний масив даних. Наукова ідея полягає не в механічному усередненні значень, а у математично керованому вирівнюванні координат CIELab з урахуванням структурних особливостей розподілу похибок у різних ділянках колірної простору [4].

Процес передбачає формування синтезованої моделі даних, де за основу береться масив із 2044 контрольних точок (стандарт IT8.7/4). Адаптація колірних координат дозволяє сформувати спільний колірний простір, де відхилення між гетерогенними пристроями мінімізується шляхом нелінійної корекції значень у вузлах LUT-таблиць. Це забезпечує стабільність кольоровідтворення та колірну ідентичність незалежно від технічних особливостей конкретної друкарської машини.

Першочерговим завданням модернізації описаного процесу є розробка та впровадження спеціалізованої алгоритмічної моделі, призначення якої полягає в автоматизації аналізу та синтезу спектрофотометричних показників колірних даних [5]. Інформаційна технологія в структурі дослідження виконує роль обчислювального ядра, що забезпечує:

- *Автоматизовану обробку масивів даних* (швидке опрацювання великих об'ємів результатів вимірювань (LUT)).
- *Ідентифікацію зон нестабільності* (програмне виявлення секторів колірної охоплення, де розбіжність ΔE перевищує встановлений технологічний допуск).
- *Синтез універсальних передавальних характеристик* (формування скоригованих таблиць пошуку, які є основою для побудови узгодженого ICC-профілю).

Впровадження запропонованої обчислювальної моделі адаптивного узгодження профілювальних LUT-таблиць дозволяє оптимізувати процес кольоропідготовки у широкоформатному виробництві, трансформуючи розрізнені спектрофотометричні вимірювання екосольвентних та сольвентних систем у синтезований колориметричний масив даних. Це забезпечує підвищення стабільності ICC-профілювання, зменшення міжпристроєвої різниці ΔE та прогнозовану точність кольоровідтворення в реальних умовах експлуатації обладнання [6].

На початковому етапі реалізації запропонованої обчислювальної моделі здійснюється спектрофотометричне зняття фізичних показників із тестової мішені IT8.7/4, що містить 2044 патчі. У результаті формується масив вимірних координат у просторі CIELab, який представлений у вигляді таблиць перетворення (LUT), отриманих під час процедури профілювання кожної друкарської системи. Саме ці профілювальні LUT-таблиці виступають емпіричною базою для подаль-

шої алгоритмічної обробки. Наступний етап передбачає програмну реалізацію моделі адаптивного синтезу, в межах якої для кожної відповідної пари вимірних значень формується результуючий вектор V_{res} , з умовою мінімізації сумарної колориметричної розбіжності ΔE . Ключовою математичною особливістю задачі є врахування різної глибини дифузії пігменту на банерному носії, що безпосередньо впливає на координати CIELab, у зонах різного рівня фарбового покриття. З цією метою вводиться адаптивна вагова нелінійна функція $W(T)$, яка залежить від сумарного покриття фарби (Total Ink Limit, T) та визначає пріоритетність внеску кожної системи у формування синтезованого значення:

$$V_{res} = f(V_{sol}, V_{eco}, W(T)),$$

де $W(T)$ - нелінійна вагова функція, що визначає ступінь впливу кожної друкарської системи на формування результуючого вектора залежно від сумарного фарбового покриття T (Total Ink Limit). У ділянках низького покриття (світлі тони) функція надає пріоритет даним екосольвентної системи, що характеризується більш стабільною передачею світлотних переходів. Натомість у зонах високого покриття (глибокі тіні), де спостерігається інтенсивна дифузія та максимальне поглинання чорнила носієм, ваговий коефіцієнт зміщується у бік сольвентної системи, яка забезпечує вищу оптичну щільність. Нижче наведено програмну реалізацію обчислювального ядра моделі мовою Python (рис. 1). Код містить модулі імпорту спектрофотометричних даних, розрахунку колориметричної різниці ΔE , та синтезу нової профілювальної LUT-таблиці з використанням адаптивних порогових механізмів.

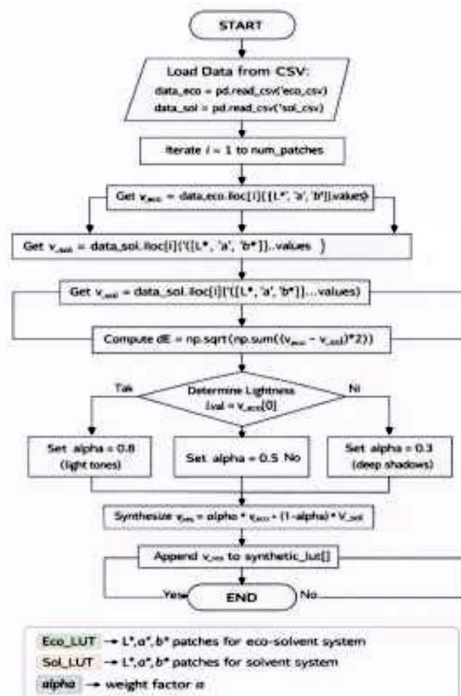


Рис.1 Алгоритм синтезу узгодженої колориметричної моделі LUT – таблиці

Розроблений програмний модуль функціонує як аналітичний інструмент синтезу узгодженої колориметричної моделі на основі реальних спектрофотометричних вимірювань двох різних друкарських систем. Його робота починається із завантаження структурованих LUT-таблиць, що містять 2044 значення патчів у координатах CIELAB. Для кожного патча виконується поелементний аналіз відповідних значень L^* , a^* , b^* та розрахунок колірної різниці ΔE за формулою CIE76, що дозволяє кількісно оцінити рівень фізичної невідповідності між системами. Ключовим етапом є адаптивна класифікація за світлотою L^* , яка забезпечує секторну декомпозицію простору. Залежно від належності до зон світлих тонів, середніх значень або глибоких тіней, алгоритм встановлює ваговий коефіцієнт α , що відображає доцільний пріоритет однієї з технологій друку. Таким чином, синтез нової точки відбувається не як механічне усереднення, а як керована інтерполяція з урахуванням фізичних характеристик чорнил та поведінки носія. Результатом роботи є нова LUT-таблиця, яка формує стабілізовану основу для побудови єдиного ICC-профілю. Це дозволяє мінімізувати міжпристрійну колориметричну варіативність та підвищити узгодженість кольоровідтворення без прямого втручання в RIP-систему [7].

У результаті отримуємо синтезовану, колориметрично узгоджену LUT-таблицю, сформовану на основі реальних спектрофотометричних вимірювань двох різних друкарських систем. Ця таблиця є не усередненим статистичним масивом, а результатом адаптивної векторної інтерполяції з урахуванням секторної класифікації світлоти та фізичних особливостей чорнил. У підсумку зменшується міжпристрійна різниця ΔE для відповідних патчів, стабілізується поведінка у світлих зонах та глибоких тінях, знижується ризик великої розбіжності або перенасичення, формується математично контрольована база для побудови єдиного ICC-профілю. Отриманий масив використовується як вхідні дані для профілювання в зовнішньому програмному забезпеченні. Тобто модуль не замінює RIP-систему, а забезпечує правильне виконання єдиного кольоропрофілю для різних друкуємих систем, що забезпечить коректне та близьке кольоровідтворення друкованих зображень.

Висновок. У результаті виконаного дослідження розроблено обчислювальну модель адаптивного узгодження таблиць перетворення (LUT), отриманих на етапі спектрофотометричного профілювання екосольвентних та сольвентних широкоформатних друкарських систем. Запропонований підхід базується на аналізі вимірних координат CIELAB, розрахунку міжпристроєвої різниці ΔE та застосуванні нелінійної вагової функції $W(T)$, що враховує сумарне фарбове покриття і фізичні особливості взаємодії чорнила з носієм.

На відміну від традиційного ізольованого профілювання або механічного усереднення даних, розроблена модель забезпечує математично керований синтез профілювальних LUT-таблиць та формування узгодженого колориметричного масиву. Це дозволяє зменшити міжпристроєву розбіжність, стабілізувати тональні переходи в різних зонах світлоти та створити основу для побудови єдиного ICC-кольоропрофілю. Отримані результати підтверджують досягнення поставленої мети та демонструють практичну доцільність застосування моделі для підвищення узгодженості кольоровідтворення у широкоформатному поліграфічному виробництві.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Spence C., Velasco C. Packaging colour and its multiple roles. *Multisensory Packaging: Designing New Product Experiences*. New York City: Springer International Publishing; 2018. P.21-48. doi: 10.1007/978-3-319-94977-2_2.
2. Тиндик Р. С. Адаптивна модель динамічної оптимізації параметрів кольоровідтворення в умовах варіативності друкованих зображень у сольвентному друці. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. Хмельницький національний університет, Хмельницький. №2 2025. С. 263-266. doi: 10.31891/2219-9363-2025-82-36.
3. Wang J. Intelligent packaging design optimisation and printing effect prediction based on computer image processing. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, Vol. 9 (1), 2024. P. 1-19. doi: 10.2478/amns-2024-3564.
4. Тиндик Р. С. Аналіз методів мінімізації розбіжностей кольоровідтворення різновидів широкоформатного струменового типу. *Комп'ютерні технології друкарства*, № 2 (52), 2025. С. 222-230. doi: 10.32403/2411-9210-2024-2-52-222-230.
5. Бондар І. О. Б 81 Теорія кольору : навчальний посібник для студентів напрямку підготовки 6.051501 «Видавничо-поліграфічна справа» / І. О. Бондар. – Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2016. – 164 с.
6. Ковальський, Б. М., Занько, Н. В., Писанчин, Н. С., & Семенів, В. В. Інформаційна технологія кольороподілу зображення: монографія. Львів: Українська академія друкарства. 2020, ISBN 978-966-322-544-9.
7. Тиндик Р. С. Development of a model to effectively minimize the negative impact of large-format solvent printing. *Ekologia i racjonalne zarządzanie przyrodą: edukacja, nauka i praktyka*. Vol 2, 2023. P. 211-214. DOI:10.58246/MFDS3545.

REFERENCES

1. Spence C., Velasco C. Packaging colour and its multiple roles. *Multisensory Packaging: Designing New Product Experiences*. New York City: Springer International Publishing; 2018. P.21-48. doi: 10.1007/978-3-319-94977-2_2.
2. Tyndyk R. S. An adaptive model for the dynamic optimization of color reproduction parameters under conditions of variability in printed images in solvent-based printing. *Measurement and Computing Technology in Technological Processes*. Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi. No. 2, 2025. pp. 263–266. doi: 10.31891/2219-9363-2025-82-36.
3. Wang J. Intelligent packaging design optimisation and printing effect prediction based on computer image processing. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, Vol. 9 (1), 2024. P. 1-19. doi: 10.2478/amns-2024-3564.
4. Tyndyk R. S. Analysis of methods for minimizing color reproduction discrepancies in various types of wide-format inkjet printers. *Computer Technologies in Printing*, No. 2 (52), 2025. pp. 222–230. doi: 10.32403/2411-9210-2024-2-52-222-230.
5. Bondar, I. O. B 81 Theory of Color: A Textbook for Students in the 6.051501 Program “Publishing and Printing” / I. O. Bondar. – Kharkiv: S. Kuznets Kharkiv National University of Economics, 2016. – 164 p.
6. Kovalsky, B.M., Zanko, N.V., Pysanchyn, N.S., & Semeniv, V.V., Information technology of image color separation: monograph. Lviv: Ukrainian Academy of Printing, 2020, ISBN 978-966-322-544-9.

7. Tyndyk R. S. Development of a model to effectively minimize the negative impact of large-format solvent printing. *Ekologia i racjonalne zarządzanie przyrodą: edukacja, nauka i praktyka*. Vol 2, 2023. P. 211-214. DOI:10.58246/MFDS3545.

doi: 10.32403/1998-6912-2026-1-72-95-101

SYNTHESIS OF COLORIMETRIC DATA FOR PROFILING LUTS IN INKJET PRINTING SYSTEMS

R. S. Tyndyk

*Lviv Polytechnic National University,
79020, Lviv, Pid Holoskom St., 19.
e-mail: tindikr@gmail.com*

The article examines the problem of inter-device colorimetric inconsistency in large-format inkjet printing under conditions of parallel operation of eco-solvent and solvent systems. Despite the use of standard ICC profiling procedures, a unified CMYK model, and identical media, physical differences in image formation mechanisms cause systematic discrepancies in CIE Lab space coordinates. As a result, even correctly constructed individual profiles do not guarantee consistent color reproduction, and the average inter-device difference ΔE exceeds acceptable values, especially in light tones and deep shadows. The aim of the work is to develop a computational model for adaptive matching of look-up tables (LUTs) obtained during spectrophotometric profiling of eco-solvent and solvent wide-format systems to form a synthesized colorimetric array and create a consistent ICC profile with minimized ΔE . The proposed approach is based not on mechanical averaging of data, but on controlled vector synthesis of CIE LAB coordinates, taking into account the spatial heterogeneity of errors. The model involves pairwise analysis of nodes, calculation of ΔE , and application of an adaptive nonlinear weighting function $W(T)$ that depends on the total ink coverage. The implementation of the model in the form of a software algorithm allows automating the analysis and synthesis of LUT tables and forming a consistent basis for building a single ICC profile, increasing the stability and predictability of color reproduction in large-format production.

Keywords: *large-format printing, solvent printing, ECO-solvent printing, color profiling, test tables (LUT), spectrophotometric data, colorimetric model, ICC profile, printing technologies, CIE Lab color space, ΔE difference, CMYK color model, algorithmic model.*

Стаття надійшла до редакції 20.03.2026.

Submitted: 20.03.2026.

Прийнято до друку: 27.04.2026.

Accepted: 27.04.2026.

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](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Р. С. Тиндик