

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-01-03>  
УДК 655.226

Луцків М. М.  
д-р, техн., наук, професор  
ORCID: 0000-0002-2921-3662

Українська академія друкарства  
/ Україна

Федина Б. І.  
канд., техн., наук, доцент  
ORCID: 0000-0001-9487-2851

Наконечний М. Д.  
ORCID: 0009-0008-1362-0803

## МОДЕЛЮВАННЯ ТОНОВІДТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ РАСТРОВНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ПРИ ЗМІНІ ТОВЩИНИ ФАРБИ

**Анотація:** у статті розроблено математичну модель тоновідтворення цифрових растрових зображень для елементів ромбічної форми при зменшенні товщини фарби на інтервалі тонопередачі у комбінованих офсетних друкарських системах простої конструкції на основі анілоксового валика у якому відсутні механізми зонального налагодження подачі фарби на заданий наклад. Дана модель дає можливість здійснити растрування цифрових зображень темних тонів і побудувати характеристики растрового перетворення, визначити кількість фарби на поверхні растрових елементів, визначити градаційні характеристики цифрових зображень після покриття растрових елементів фарбою та визначити інтегральну растрову оптичну густину зображень. Для спрощення розв'язання поставлених завдань в пакеті MATLAB: Simulink розроблена структурна схема моделі симулятора тоновідтворення цифрових зображень при зменшенні товщини фарби, яка дає можливість розрахувати і будувати характеристики растрування, графіки кількості фарби на поверхні растрових елементів та растрової оптичної густини зображень, а їх результати візуалізуються блоками Scope і Display.

Результатом моделювання заданої градаційної характеристики вхідного цифрового зображення темної тональності є легко вгнута крива, яка на початку діапазону має малу крутизну, що не викликає постеризацію на темних ділянках зображення, тому не погіршує результатів дослідження. Ромбічні растрові елементи розтягують характеристику растрування, зсувають її у більш темні тони і притемнюють деталі на темних ділянках зображення та розсвітлюють світлі. Встановлено, що зменшення товщини фарби на інтервалі значно впливає на кількість фарби на поверхні растрових елементів, а відтак на тональність зображення. Початкові значення растрової оптичної густини зображення становить 2,407 одиниць. Зменшення товщини фарби значно зменшує оптичну густину зображення і на початку діапазону при  $L_0=50$  рівнів різниці оптичних густин становить 0,68

одиниць і є досить велика та кількісно оцінює вплив зміни товщини фарби на оптичну густину зображення.

**Ключові слова:** модель, тоновідтворення, цифрове зображення, растрівання, друкарська система, товщина фарби, симулювання, градаційні характеристики, оптична густина.

## ВСТУП, ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасна технологія приготування зображень до друку набула нового змісту і відмінна від попередніх. Основні процеси і обробка образотворчої інформації виконується за допомогою спеціалізованих комп'ютерних видавничих системах. Растрівання і синтез тоновідтворення здійснюється за умови, що друкарська система оснащена автоматичною системою багатоканальної зональної подачі фарби на заданий наклад, яка забезпечує сталу подачу товщини фарби на поверхні відбитка офсетної друкарської машини. Західні фірми розробили і почали оснащувати друкарські машини простими за конструкцією комбінованими фарбодрукарськими апаратами, які мають малу кількість фарбових валиків та у яких відсутні механізми регулювання її подачі.

Встановлено, що товщина фарби на відбитку може змінюватися на 20-30 %, що обмежує їх застосування для якісного друку книжкової та журнальної продукції [2, 3, 4, 7, 8]. У доступних джерелах відсутня інформація та аналіз впливу зміни товщини фарби на тоновідтворення цифрових растрових зображень на інтервалі тонопередачі. Отже моделювання тоновідтворення цифрових растрових зображень при зміні товщини шару фарби на інтервалі є актуальним завданням.

## АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У комбінованих фарбодрукарських системах відбуваються складні процеси модуляції неперервних фарбових потоків растровою друкарською формою та передача фарбового зображення через офсетний циліндр на задрукований матеріал. Тому відомі методи теорії модуляції сигналів для растрівання зображень безпосередньо неможливо застосувати для фарбодрукарських систем. У ряді праць опрацьовані статичні і динамічні моделі друкарських систем різної розмірності й структури, які їх характеризують як об'єкт регулювання товщини шару фарби на виході системи при дії різних впливів та збурень [3, 7, 8]. У працях [7, 8] подані результати моделювання й аналізу статичної точності товщини потоків фарби у комбінованих фарбодрукарських системах і встановлено, що товщина шару фарби залежить від розмірності системи і може знаходитися в межах 20-30 %. У роботі [7, 8] розроблені і проаналізовані моделі тоновідтворення виражені кількістю фарби на поверхні растрової шкали на відбитку та інтервалі тонопередачі, яка визначається за графом фарбодрукарської системи.

На основі графа фарбодрукарської системи і виразу (1) розраховано та побудовано характеристики нафарблення для систем різної розмірності і проаналізовані їх властивості:

$$G_o = F(h_\varphi, S_{\text{ЛН}}), \text{ якщо } 0 \leq S_{\text{ЛН}} \leq 1, \quad (1)$$

де:  $h_\phi$  – залежність товщини фарби від інтервалу тонопередачі;

$S_{LH}$  – лінійна растрова шкала друкарської форми, яка змінюється в межах  $[0 \leq S_{LH} \leq 1]$ .

В монографії [2] викладені статичні та динамічні моделі передачі фарбових потоків у комбінованих фарбодрукарських системах послідовної структури різної розмірності. Побудовано та проаналізовано характеристики товщини шару фарби на виході системи та встановлено, що статична точність товщини сягає 20-30 % залежно від розмірності. Розроблено моделі передачі кількості фарби для контрольної растрової друкарської форми та її передачі на офсет і задрукований матеріал. Опрацьовано алгоритм синтезу тонопередачі комбінованих фарбодрукарських систем на основі кількості фарби (1) і бажаної (заданої) характеристики тонопередачі, яка залежить від сюжету оригіналу і відповідає характеристиці растрування форми  $S_z$  та кількості фарби на відбитку:

$$G_b = h_\phi \times S_z. \quad (2)$$

Характеристика коригувальної ланки визначається із умови рівності виразів (1) і (2). Розроблено симулятори синтезу тонопередачі комбінованих фарбодрукарських систем різної розмірності. Зауважимо, що розроблений синтез тонопередачі на основі кількості фарби має обмеження, а параметри синтезу не пов'язані із градаційними характеристиками цифрових зображень, тому технолог, дизайнер і друкар не мають можливості безпосередньо управляти процесом, використовуючи градаційні характеристики цифрових зображень, що зменшує ефективність та якість синтезу.

#### **ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ**

Розробити математичну модель тоновідтворення цифрових зображень, визначити кількість фарби на поверхні растрових елементів і цифрового зображення після покриття фарбою та визначити його оптичну густину, розробити симулятор тоновідтворення, подати і проаналізувати результати імітаційного моделювання.

#### **ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ**

Растрування є важливою стадією підготовки зображення і виготовлення друкарських форм, необхідних для друку. Воно значною мірою впливає на якість друкованого зображення. Для розв'язання поставленої задачі моделювання тоновідтворення цифрових растрованих зображень при зміні товщини шару фарби на інтервалі приймаємо, що задана нормована градаційна характеристика цифрового зображення заданої тональності, яку згенеруємо за допомогою традиційного степеневого перетворення [6, 10]:

$$L_n = cL_o^{1,6}, \text{ якщо } 0 \leq L_o \leq 1, \quad (3)$$

де:  $L_0$  – лінійна шкала;

$c$  – масштаб, значення показника степені  $r = 1,6$  задає нормовану градаційну характеристику цифрового зображення  $L_n$ , яка подана рівнями сірого в межах  $0 \leq L_n \leq 1$ .

Здійснимо растрівання цифрового зображення (3) і визначимо відносну площу растрових елементів [6]:

$$S = 1 - L_n. \quad (4)$$

Для дослідження приймаємо ромбічні растрові елементи. Характеристика растрівання має  $S$  – подібну форму, яка описується інтегральним виразом [4], і яку сформуємо функцією  $S$  – shaped MF і тоді на основі виразу (4) відносна площа ромбічної форми набуде вигляду:

$$S_r = S\text{-shapedMF}(1 - L_n), \text{ якщо } 0 \leq L_n \leq 1. \quad (5)$$

Визначимо кількість фарби на одиницю поверхні растрових елементів ромбічної форми:

$$V_r = S_r \times H, \quad (6)$$

де:  $H$  – товщина фарби на поверхні растрових елементів подана у відносних одиницях.

На основі кількості фарби визначено цифрове зображення після покриття фарбою:

$$L_{fr} = (1 - V_r) \times 255. \quad (7)$$

Звідси визначимо растрову оптичну густину нафарбленого зображення [6]:

$$D = \log_{10} \left[ \frac{255}{(L_{fr} + 1)} \right]. \quad (8)$$

На основі викладеного і виразів (3)-(8) можна розрахувати та побудувати градаційні характеристики, характеристики растрівання, нафарблення й графіки оптичної густини. Для спрощення розв'язання поставлених завдань застосовано об'єктно-орієнтоване моделювання в пакеті MATLAB: Simulink та розроблено модель симулятора тоновідтворення цифрових растрових зображень при зміні товщини шару фарби на інтервалі тонопередачі, структурну схему якого подано на рисунку 1.

Основними складовими моделі симулятора є функціональні блоки математичних функцій  $F_{cn}$ , які здійснюють необхідні розрахунки за виразами

(3)-(8), та результати яких візуалізуються блоками Scope. Блок Ramp генерує лінійну шкалу  $L_0$ , яка масштабується (ділиться на 255) у блоці Gain і подається на вхід блоку математичних функцій  $F_{cn}$  у діалоговому вікні якого записана програма (вираз (3)) для формування нормованої градаційної характеристики  $L_n$ , яка візуалізується блоками Scope і подається на вхід блоку математичних функцій  $F_{cn1}$ , який за виразом (4) розраховує відносну площу  $S$  растрового перетворення і подає на вихід на вхід блоку S – shaped, у якому формується ромбічна форма елемента  $S_r$ , яка візуалізується блоком Scope 1. Блок Ramp 1 і блок математичних функцій  $F_{cn2}$  формують змінну відносну товщину фарби  $H$  на інтервалі тонопередачі, яка подається на вхід блоку множення Product. На його другий вхід подається відносна площа  $S_r$ , внаслідок чого на його виході одержується кількість фарби  $V_r1$ , яка подається на вхід блоку математичних функцій  $F_{cn3}$  у діалоговому вікні якого записана програма (вираз (7)) для обчислення цифрового зображення  $L_{fr1}$  після покриття фарбою і подається на вхід блоку математичних функцій  $F_{cn4}$  у якому за виразом (8) розраховується растрова оптична густина зображення  $D1$ , яка подається на мультиплексор і візуалізується блоком Scope 5.

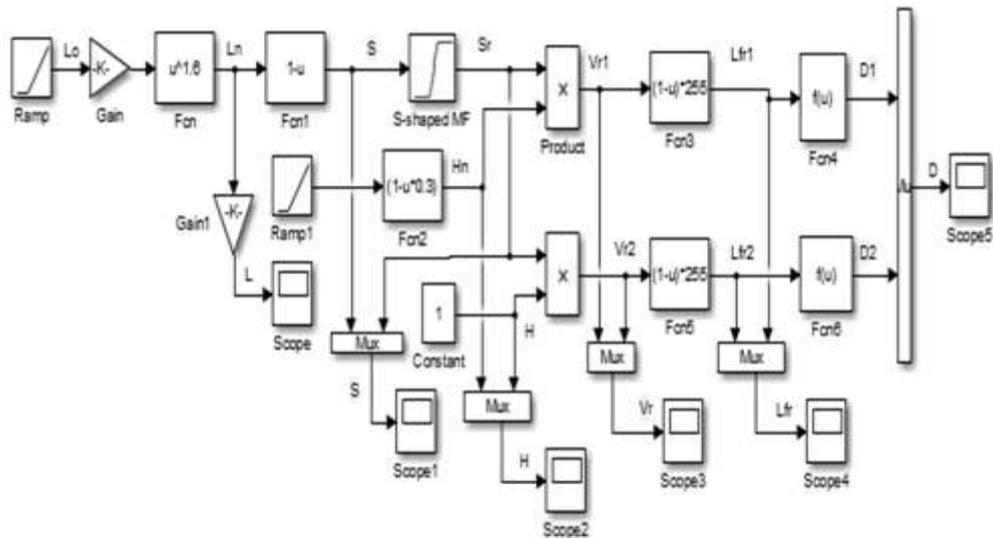


Рисунок 1 – Структурна схема моделі симулятора

У нижній частині розташована схема для визначення параметрів моделі при сталій товщині фарби. У другому блоці множення Product 1 визначається кількість фарби на поверхні растрових елементів при сталій відносній товщині фарби  $H = 1$ , яка подається на вхід блоку математичних функцій  $F_{cn5}$ . У цьому блоці визначається цифрове зображення  $L_{fr2}$ , яке подається на вхід блоку математичних функцій  $F_{cn6}$ , де визначається растрова оптична густина  $D2$  зображення при сталій товщині фарби, яка візуалізується блоком Scope 5.

Після налаштування симулятора на задані параметри (3) – (8) задаємо у блоці математичних функцій  $F_{cn}$  показник степені  $r = 1,6$ , який відповідає

чорним тонам. Налаштували блок S – shaped на параметри [0,1], що відповідають ромбічній формі растрових елементів. Результати імітаційного моделювання заданої градаційної характеристики цифрового зображення подані на рисунку 2.

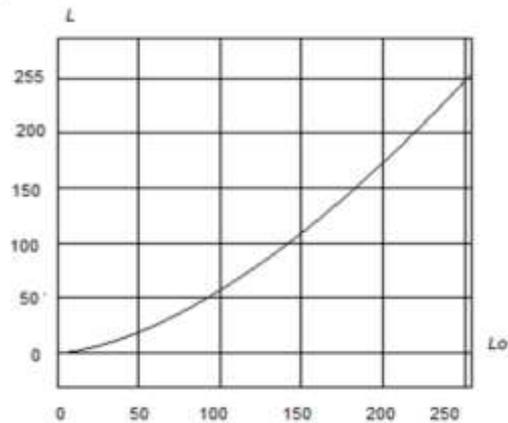


Рисунок 2 – Градаційна характеристика заданого зображення

Градаційна характеристика заданого вхідного цифрового зображення – це легко вгнута крива, яка на початку діапазону тонопередачі має малу крутизну, що не викликає постеризації на темних ділянках зображення, тому не погіршує результати дослідження.

Результати моделювання характеристик растрування зображення подані на рисунку 3.

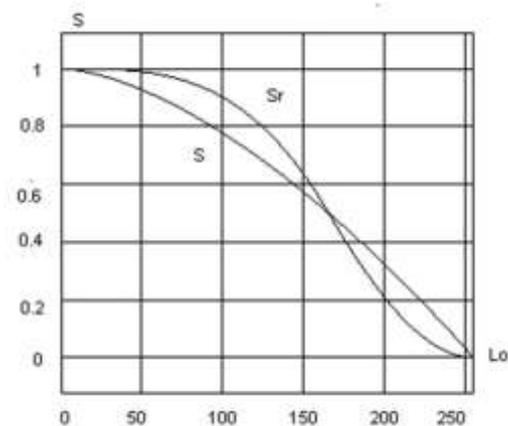


Рисунок 3 – Характеристика растрового перетворення

Характеристика растрування вхідного зображення S є легко випуклою кривою, яка має початкове значення відносної площі рівне одиниці, що

відповідає чорному кольору і плавно прямує до нульового кінцевого значення. Ромбічні растрові елементи розтягують характеристику растрування та зсовують у більш темні тони. В околі  $L_o = 170$  рівнів вона стає більш крутою, перетинає попередню криву, а її крутизна зменшується, стає вгнутою кривою та прямує до нульового значення. Отже ромбічна форма растрових елементів значною мірою впливає на растрове перетворення, притемнює деталі на темних ділянках зображення, натомість розсвітлює світлі ділянки зображення.

Результати моделювання кількості фарби на поверхні растрових елементів різної форми при відносній зміні товщини фарби в межах  $[1 \leq H \leq 0,7]$  і при сталій товщині фарби подані на рисунку 4.

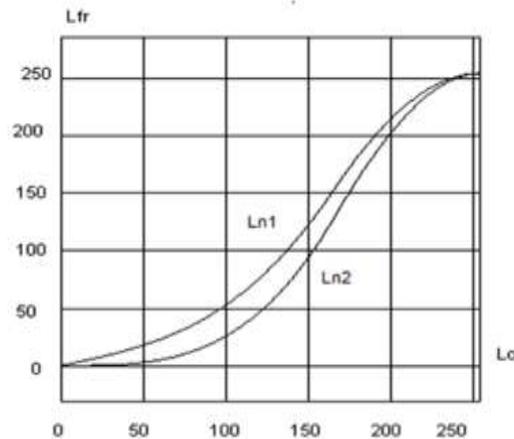


Рисунок 4 – Графіки кількості фарби на поверхні растрових елементів

Графіки відносної кількості фарби на поверхні растрових елементів на інтервалі тонопередачі є випуклими кривими, мають початкове значення відносної кількості фарби рівне одиниці. При зміні товщини фарби в межах  $[1, 0,7]$  характеристика кількості фарби  $V_{r1}$  має меншу крутизну і розташована значно нижче ніж при кількості фарби  $V_{r2}$  для сталої товщини фарби та зміщена у темні тони. Отже зменшення товщини фарби на інтервалі значно впливає на кількість фарби на поверхні растрових елементів, а відтак на тональність зображення.

Результати моделювання градаційних характеристик цифрового зображення після растрування і покриття фарбою подані на рисунку 5.

Градаційні характеристики нафарблених зображень є вгнутими кривими. Градаційна характеристика  $L_{fr1}$  при зменшенні товщини фарби на інтервалі тонопередачі на початку інтервалу має велику крутизну, добре відтворює деталі на темних ділянках зображення, натомість градаційна характеристика  $L_{fr2}$  при сталій товщині фарби має малу початкову крутизну і розташовується нижче попередньої, тому притемнює зображення на початку і в середині діапазону тонопередачі.

Результати моделювання растрової оптичної густини зображень подані на рисунку 6.

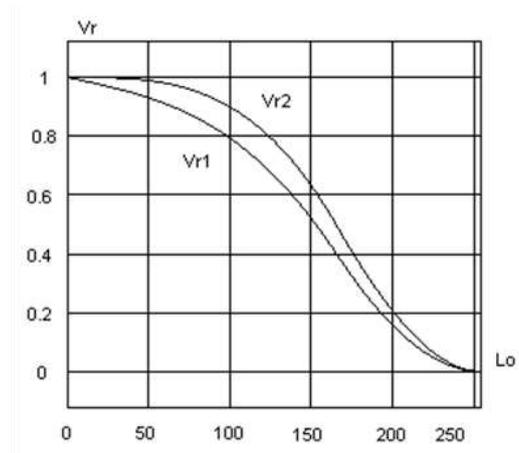


Рисунок 5 – Градаційні характеристики цифрового зображення після растровання і покриття фарбою

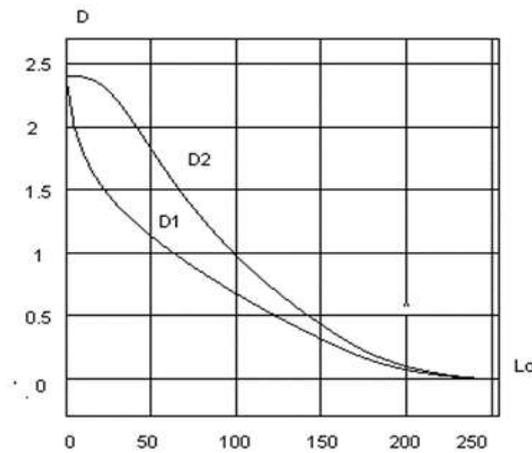


Рисунок 6 – Графіки растрової оптичної густини зображень

### ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Позитивні результати перевірки слід оформляти свідоцтвом перевірки, а в паспорті приладу виконується запис результатів перевірки і ставиться дата і підпис особи, яка проводила перевірку, скріплена відбитком повірочного тавра.

При негативних результатах перевірки датчик до застосування не допускається. У паспорті (або документі його замінює) здійснюється запис про непридатність датчика, а повірочного тавра годиться.

За результатами перевірки складається протокол запису результатів перевірки за відповідною формою. Початкові значення растрової оптичної густини зображень становлять 2,407 одиниць. Графік оптичної густини D1 при зміні товщини фарби є вгнутою кривою і плавно прямує до кінцевого нульового значення. Натомість графік оптичної густини D2 при сталій товщині фарби є випуклою кривою, яка розташована вище попередньої, що викликає

притемнення зображення на усьому інтервалі тонопередачі. Встановлено, що на початку діапазону при  $L_0 = 50$  рівнів при зміні товщини фарби оптична густина становить  $D1 = 1,17$  одиниць, а при сталій товщині фарби  $D2 = 1,85$  одиниць. Зауважимо, що традиційно растрова оптична густина кількісно оцінює тональність растрового зображення, тому різниця оптичних густин  $0,68$  одиниць є досить велика і кількісно оцінює вплив зміни товщини фарби на оптичну густину зображення.

Результати досліджень можна застосувати під час підготовки цифрових зображень до друку на друкарських машинах з комбінованими фарбодрукарськими апаратами.

### ВИСНОВКИ

Розроблено математичну модель тоновідтворення цифрових растрових зображень при зміні товщини фарби у комбінованих офсетних фарбодрукарських системах, яка дає можливість здійснити растрування заданих цифрових зображень для ромбічних растрових елементів, визначити кількість фарби на поверхні растрових елементів, визначити цифрові зображення після покриття фарбою і оптичну густину нафарбленого зображення.

В пакеті MATLAB: Simulink розроблено модель симулятора тоновідтворення цифрових растрових зображень при зміні товщини шару фарби, яка дає можливість розрахувати і побудувати характеристики растрування, графіки кількості фарби на поверхні растрових елементів та визначати растрову оптичну густину зображень.

Було задано вихідну градаційну характеристику темних тонів зображень, ромбічну форму растрових елементів і зміну товщини шару фарби на інтервалі в межах  $[0,7 - 1,0]$  відносних одиниць. Встановлено, що ромбічні растрові елементи розтягують характеристику растрування і зміщують її у більш темні тони, яка в околі  $L_0 = 170$  рівнів стає більш крутою, а на світлому діапазоні стає вгнутою кривою і послідовно прямує до нульового значення. Отже, ромбічна форма растрових елементів значною мірою впливає на растрове перетворення та притемнює деталі на темних ділянках зображень, натомість розсвітлює світлі. Доведено, що змінна товщини фарби на інтервалі зміщає характеристику кількості фарби на поверхні растрових елементів, а відтак впливає на тон зображення.

Встановлено, що початкові значення растрової оптичної густини зображень становлять  $2,407$  одиниць. Графік оптичної густини при сталій товщині фарби є випуклою кривою, яка розташована вище графіка оптичної густини при зміні фарби, що викликає значне притемнення зображень на усьому інтервалі тонопередачі. Доведено, що на початку діапазону при  $L_0 = 50$  рівнів при зміні товщини фарби оптична густина становить  $D1 = 1,17$  одиниць, а при сталій товщині  $D2 = 1,85$  одиниць. Зауважимо, що традиційна растрова оптична густина кількісно оцінює тональність растрового зображення, тому різниця оптичних густин  $0,68$  одиниць є досить велика і кількісно оцінює вплив зміни товщини фарби на оптичну густину зображення.

На основі проведених досліджень та результатів імітаційного моделювання встановлено, що необхідно більше уваги приділяти вибору форми растрових елементів і зміні товщини шару фарби на інтервалі тонопередачі, щоб не внести зайвих спотворень зображень.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Барановський І. В., Яхимович Ю. П. Поліграфічна переробка образотворчої інформації: навч. посіб. Київ-Львів : ІЗМН, 1998. 400 с.
- [2] Дурняк Б. В., Сеньківський В. М., Луцків М. М., Мусійовська М. М. Інформаційна технологія тоновідтворення в коротких фарбодрукарських системах послідовної структури: монографія. Львів, УАД. 2021. 176 с.
- [3] Лозовий П. І. Симулятор статичних характеристик фарбопередачі растрового зображення фарбодрукарською системою фірми Witag. *Технологія і техніка друкарства*: зб. наук. праць. Львів : УАД, 2010, Вип. 2. С.171-178.
- [4] Луцків М. М., Курка П. З. Модель нафарблення растрових елементів ромбічної форми. *Комп'ютерні технології друкарства*: зб. наук. праць. Львів : УАД, 2015. №2 (34). С. 80-87.
- [5] Луцків М. М., Мусійовська М. М. Моделювання тоновідтворення, вираженої кількістю фарби на растрових точках. *Наукові записки*: зб. наук. праць. Львів : УАД, 2011. №4 (34). С. 265-268.
- [6] Мартинюк В. Т. Основи додрукарської підготовки образотворчої інформації: підручник. Кн. 3 : Процеси опрацювання образотворчої інформації. Київ : Університет «Україна», 2009. 291 с.
- [7] Мусійовська М. М. Статична точність коротких фарбодрукарських систем при відтворенні тонового зображення. *Поліграфія і видавнича справа*: зб. наук. праць. Львів : УАД, 2011. №1 (53). С. 128-138.
- [8] Мусійовська М. М. Аналіз точності короткої друкарської системи послідовної структури залежно від її розмірності. *Квалілогія книги*: зб. наук. праць. Львів : УАД, 2010. №1 (28). С. 43-51.
- [9] Пашуля П. Л. Стандартизація, метрологія, відповідність, якість у поліграфії: підручник. Львів : УАД, 2011, 408 с.
- [10] Gonsales C., Woods E. Digital image pressing: International Version 3<sup>rd</sup> Edition, Inc publishing as Printice Hall. Copyright. 2008. 1104 s.

### **SIMULATION OF TONE REPRODUCTION OF DIGITAL RAST IMAGES WITH CHANGE OF PAINT THICKNESS**

**Lutskiv M.** DThSc., Professor  
**Fedyna B.** PhD, Associate Professor  
**Nakonechnyi M.**  
**Ukrainian Academy of Printing / Ukraine**

**Abstract.** A mathematical model of tonal reproduction of digital raster images for elements of a rhombic shape with a decrease in the thickness of the paint on

the tonal transfer interval in combined offset printing systems of a simple design based on an anilox roller, which lacks mechanisms for zonal adjustment of paint supply to a given overlay, has been developed, which makes it possible to perform rasterization of digital images of dark tones and plot the characteristics of the raster transformation, determine the amount of paint on the surface of the raster elements, determine the gradation characteristics of digital images after covering the raster elements with paint, and determine the integral raster optical density of images. In order to simplify the solution of the tasks in the MATLAB: Simulink package, a structural diagram of the model of the simulator for tonal reproduction of digital images with a decrease in paint thickness has been developed, which makes it possible to calculate and build raster characteristics, graphs of the amount of paint on the surface of raster elements and the raster optical density of images, and their results are visualized by the Scope and Display blocks.

The presented results of simulation of the given gradation characteristic of the input digital image of a dark tonality is a slightly concave curve and has a small slope at the beginning of the range, which does not cause posterization in the dark areas of the image, therefore, does not impair the research results. Rhombic raster elements stretch the raster characteristic and shift it to darker tones and darken the details in the dark areas of the image and lighten the light ones. It was established that the decrease in the thickness of the paint on the interval significantly affects the amount of paint on the surface of the raster elements, and therefore the tonality of the image. The initial values of the raster optical density of the image is 2.407 units. A decrease in paint thickness significantly reduces the optical density of the image, and at the beginning of the range at  $L_0=50$  levels, the difference in optical densities is 0.68 units, which is quite large and quantitatively evaluates the effect of changing the paint thickness on the optical density of the image.

**Keywords:** model, tone reproduction, digital image, rasterization, printing system, paint thickness, simulation, gradation characteristics, optical density.

---

Дата першого надходження статті до видання	Дата прийняття статті до друку статті після рецензування	Дата оприлюднення
17.02.2025 р.	25.04.2025 р.	21.06.2025 р.