

УДК 655.226

## МОДЕЛЮВАННЯ РАСТРОВОГО ТОНУ ТА ОПТИЧНОЇ ЩІЛЬНОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ ТЕМНИХ ТОНІВ

А. В. Янчинський

*Національний університет «Львівська політехніка»  
вул. С. Бандери, 12, Львів 79013, Україна*

*Розроблено математичну модель показника растрового тону, вираженого відносною площею растрових елементів у відсотках та растрової оптичної щільності цифрових зображень для різних варіантів тоновідтворення на ділянках інтервалу тонопередачі темних тонів.*

*В панелі MATLAB:Simulink розроблено структурну схему моделі симулятора для визначення характеристик відтворення растрових тонів. Побудовані графіки зміни показника тону, поданого відносною площею растрових елементів у відсотках, градаційні характеристики відтворення вхідного зображення та оптичної щільності для вибраного інтервалу тонопередачі темних тонів, здійснено їх аналіз. Результати імітаційного моделювання подані у вигляді сімейства кривих для типових варіантів растрування стосовно градаційних характеристик, показників растрових тонів у відсотках та растрових оптичних густин і проаналізовано їхні властивості.*

*Встановлено, що показники тону растрових елементів, виражені у відсотках відносно площі, дозволяють кількісно оцінити оптичну щільність після растрування зображення та прийняти рішення щодо коригування процесу для підвищення якості друкованої продукції.*

**Ключові слова:** *цифрові зображення, імітаційна модель, градаційні характеристики, растрування, показник тону, оптична густина, симуляція, властивості, якість.*

**Постановка проблеми.** Інформаційні засоби додрукарської обробки цифрових зображень відкрили нові можливості для ефективного управління цим процесом. Однією з найважливіших операцій в ході приготування цифрових зображень є растрування. Воно здійснюється за допомогою спеціальних програм і не завжди гарантує одержання якісного кінцевого результату. Не зважаючи на значний прогрес у розвитку інформаційної теорії цифрової обробки та перетворення зображень, теоретичні аспекти моделювання растрового процесу поки що розвинені недостатньо. Потребує перегляду і дороблення теоретична база, на якій побудовані алгоритми систем растрування цифрових зображень у поліграфії, яка в переважній більшості є закритою, через те, що знаходиться в інтелектуальній власності фірм виробників.

У пакетах растрування бракує програм для ефективного управління градаційною характеристикою процесу растрування, що негативно впливає на кінцевий

результат процесу. Оператор, який готує цифрове зображення до друку, задає роздільну здатність, лініатуру растра, форму растрових елементів (квадратну, круглу, ромбічну). Але він діє в рамках закладеного програмою однотипного алгоритму растрування, що визначає закон зміни площі растрових елементів в залежності від оптичної щільності оригіналу, і не може вплинути на сам перебіг процесу растрування. В зв'язку з цим для користувача практично не доступна можливість обґрунтованого вибору форми і розмірів растрових елементів для зображень різної тональності (темної, середньої, світлої) і їхніх градієнтних показників.

Завдання ускладняється ще й тим, що у більшості випадків діючий оператор не має перед собою справжнього оригіналу зображення, а коригування здійснюється на чорному тлі монітора, в той час як друковане зображення відтворюється кольоровими фарбами на білому тлі. Через це йому буває трудно інтуїтивно довести вигляд зображення на моніторі до готового растрового відбитка.

Для подолання цих труднощів і забезпечення підвищеної якості друкованих відбитків в поліграфії часто застосовують різні контрольні тести, які аналізують за допомогою денсометричних вимірювань. При цьому необхідно додатково здійснити ряд операцій: виготовити друкарську форму із тестовою тональною шкалою, провести пробний друк, здійснити сканування відбитка і ще раз скоригувати зображення на моніторі, що вимагає значних часових і матеріальних витрат [6, 7].

Значно ефективніше й простіше це можна здійснити за допомогою інформаційного комп'ютерного моделювання растрового процесу, за допомогою якого знайти оптимальне рішення без додаткових затрат і інвестицій.

Отже, моделювання растрового тону, вираженого відносною площею растрових елементів у відсотках та растрової оптичної щільності зображень для кількісної оцінки процесу растрування цифрових зображень є актуальним завданням.

**Огляд останніх досліджень та публікацій.** Поширені різноманітні вербальні описи процесу растрування засвідчують його фізичну складність, що затрудняє розуміння його суті і математичне рішення. При перетворенні півтонового зображення з неперервної у дискретну растрову форму існує ще й доволі істотна можливість функціональна впливу на показники тонопередачі, себто можливість управління цими перетвореннями [1, 2]. Існуючі програмні пакети растрування, як правило ігнорують цією можливістю і зводять його до однозначної стандартної функції [3, 4].

Розвиток комп'ютерної графіки сприяв розробці різних методів, зокрема, частотного, гібридного, стохастичного та певних алгоритмів растрування окремих фірм [5, 6]. З досвіду їхнього застосування підтверджується значне підвищення якості друкованої продукції, але щоб досягти його треба виконати доволі жорсткі вимоги щодо стандартизації і нормалізації усіх процесів, матеріалів, устаткування, друкарських машин, наявності автоматизованої системи зонального налагодження на заданий наклад та ін. [7].

Основним недоліком новітніх алгоритмів є те, що вони будуються на основі стандартизованих растрових елементів розміром від 10 до 20 мкм. Вони дуже чутливі до явища розтискування (dot gain), що й обумовлює цю виняткову

жорсткість вимог до матеріалів і устаткування. Наприклад, роздільна здатність фото полімерних копіювальних шарів знаходиться в межах від 4 до 8 мкм [8] і є спів мірна із растровими елементами.

В останні роки активізувалися альтернативні цільові дослідження растрування зображень спрямовані на пошук і розроблення алгоритмів растрування менш чутливих щодо матеріалів, розтиску і устаткування.

У публікаціях [9, 10] приведено опис дослідження моделі нормованого растрового перетворення для елементів квадратної, круглої і ромбічної форми, побудовано характеристики растрування і проаналізовано їх властивості. Наведено, як комбінуючи зміною форми растрового елемента на певних тонових діапазонах, можна покращити показники тонопередачі

Суттєві питання застосування растрового ступеневого перетворення розглянуті в публікації [11]. Наведено засоби для уникнення явища постеризації, яке спотворює зображення та обмежує можливості для корекції темних ділянок зображення при підготовці зображення до друку.

В попередніх публікаціях за участю автора цієї статті [12...17] розглядаються актуальні практичні питання, які виникають при запровадженні растрового процесу, що розраховується на основі застосування ступеневої функції.

У публікаціях [12, 13] приведено результати аналізу імітаційного моделювання растрового процесу для типових варіантів характеристик нормованого ступеневого растрового перетворення.

В публікаціях [14, 15] висвітлені технологічні проблеми, які виникають при застосуванні нормованого ступеневого растрового перетворення в друкарському процесі. Моделюється об'ємне нафарблення растрове перетворених цифрових зображень світлих і темних тонів.

В публікації [16,] викладені аспекти моделювання нафарблення растрове перетворених цифрових зображень відтворення світлих тонів і розглянуто проблеми низькочастотного фільтрування растрових зображень,

В публікації [17] приведено детальний наліз тоновідтворення світлих друкованих растрових зображень на основі розрахунку їх оптичної щільності.

В даній роботі продовжуються розпочаті раніше цільові дослідження растрування зображень направлені на пошук і розроблення алгоритмів растрування менш чутливих щодо матеріалів, розтиску і устаткування, що є актуальним завданням.

**Мета роботи** – розробити математичну модель растрового тону, розробити симулятор растрування та оптичної щільності, здійснити імітаційне моделювання растрового перетворення градаційних характеристик типових варіантів цифрових зображень темних тонів, проаналізувати властивості виконаного дослідження, яке відповідно розширяє функціональні можливості приготування цифрових зображень до друкування.

**Вклад основного матеріалу дослідження.** Якість передавання тонів у поліграфії переважно оцінюється денситометричними методами. На контрольних тестових шкалах вимірюють оптичну щільність і визначають показники, які характеризують технологічні умови процесу: величину розтискування растрових елементів,

показник сприйняття фарб, контраст сірого, тощо. Важливим показником якості відтворення друкованого зображення служить відносний контраст друку, який визначають за коефіцієнтом Ширмера [8], на основі порівняння оптичної щільності плашки  $D_n$  з растровою оптичною щільністю контрольної шкали  $D_r$  із відносною площею 80%:

$$K = (D_n - D_r) / D_n \cdot 100\%.$$

Сучасні вимірювальні прилади розраховують цей коефіцієнт автоматично.

Оптичну щільність демоуляції растрового зображення розраховують за формулою Юля-Нільсена [1]:

$$D_r = -n \lg \left[ S \cdot 10^{\frac{D_\phi}{n}} + (1 - S) \cdot 10^{\frac{D_n}{n}} \right], \quad (1)$$

де  $S$  – відносна площа растрових елементів,  $D_\phi$  – оптична щільність шару фарби на плашці,  $D_n$  – оптична щільність паперу,  $n$  – показник степені, який залежить від лініатури растра і типу паперу, значення якого знаходиться в межах від 1,0 до 3,0.

При розрахунках растрової оптичної щільності, зазвичай, приймають, що відносна площа растрових елементів змінюється за лінійною шкалою [ $0 \leq S \leq 1$ ]. Слід відзначити, саме відносна площа растрових елементів вважається основним носієм інформації про тональність зображення. Отже, практичне застосування формули Юля-Нільсена розширює можливості аналізу щодо використаних алгоритмів.

Для розрахунків растрової оптичної щільності для растрового перетворення, вираженого відносною площею у відсотках  $S\%$ , (ланцюг: цифрове зображення, відносна площа, оптична щільність) використано формулу:

$$D_r = \left[ 2 - \lg(100 - S(\%) + 1) \right] \cdot M_d, \quad (2)$$

де  $M_d$  - масштабний коефіцієнт, числове значення якого залежать від заданої оптичної щільності плашки.

Для дослідження розглянуто три типові варіанти нормованого цифрового зображення темних тонів на основі степеневого перетворення:

$$L_{n1} = L_0^{1,3}, \quad (3)$$

$$L_{n2} = L_0^{1,6}, \quad (4)$$

$$L_{n3} = L_0^{1,9}, \text{ якщо } 0 \leq L_0 \leq 255, \quad (5)$$

де  $L_0$  – лінійна шкала.

Здійснено растрове перетворення типових варіантів та подане відносною площею, вираженою у відсотках:

$$S_1(\%) = (1 - L_1) \cdot 100, \quad (6)$$

$$S_2(\%) = (1 - L_2) \cdot 100, \quad (7)$$

$$S_3(\%) = (1 - L_3) \cdot 100. \quad (8)$$

На основі виразу (2) визначили растрову оптичну щільність типових варіантів зображень темних тонів:

$$D_{r1} = \left[ 2 - \lg(100 - S_1(\%) + 1) \right] \cdot M_{d1}, \quad (9)$$

$$D_{r2} = \left[ 2 - \lg(100 - S_2(\%) + 1) \right] \cdot M_{d2}, \tag{10}$$

$$D_{r3} = \left[ 2 - \lg(100 - S_3(\%) + 1) \right] \cdot M_{d3}, \tag{11}$$

де  $M_{d1}, M_{d2}, M_{d3}$  – масштабні коефіцієнти, числові значення яких залежать від заданої оптичної щільності плашки.

Для дослідження розроблено структурну схему моделі симулятора растрівання та оптичної щільності в пакеті MATLAB:Simulink, який дає можливість будувати градаційні характеристики типових варіантів вхідного цифрового зображення. Структурна схема моделі симулятора растрівання подана на рис. 1.

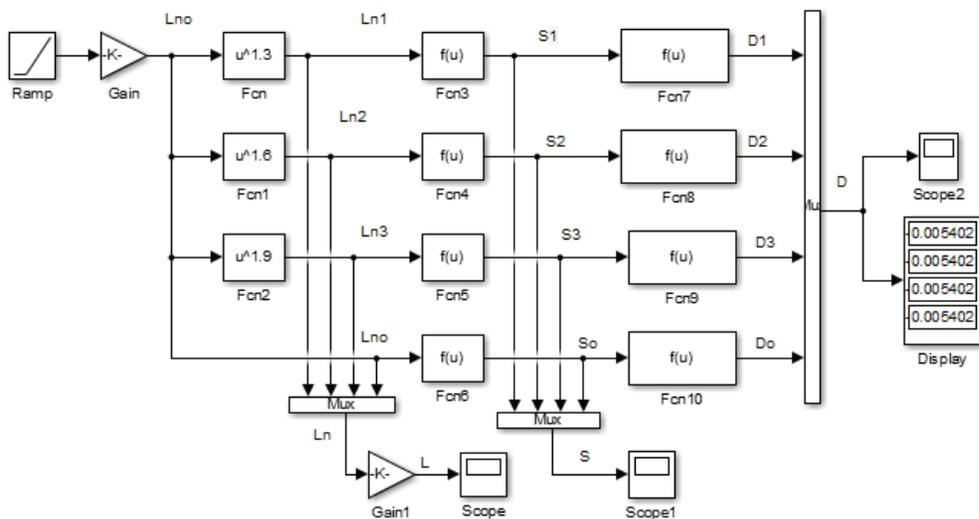


Рис. 1. Структурна схема моделі симулятора растрівання

У операційному блоці Ramp генерується лінійна шкала  $L_0$ , яка масштабується ( $L_0 = 1/255 L$ ) у блоці Gain і подається на входи функціональних блоків математичних функцій  $F_{cn1}, F_{cn2}, F_{cn3}$ , у діалогових вікнах, яких записано програмні вирази (3), (4), (5) для типових варіантів нормованих цифрових зображень. Одержані значення  $L_{n1}, L_{n2}, L_{n3}$  подаються на входи блоків математичних функцій  $F_{cn3}, F_{cn4}, F_{cn5}$ , у діалогових вікнах яких записано програмні вирази (6), (7), (8) растрового перетворення для типових варіантів та подані відносною площею у відсотках  $S_1, S_2, S_3$ . Далі ці значення відповідно подаються на входи математичних функцій  $F_{cn7}, F_{cn8}, F_{cn9}$ , у діалогових вікнах яких записано програмні вирази (9), (10), (11) для визначення растрової оптичної щільності зображень темних тонів  $D_1, D_2, D_3$ . Для порівняння, внизу визначили відносну площу лінійної шкали  $S_0$  і її растрову оптичну щільність  $D_0$ . Результати моделювання візуалізується у блоках Scope і Display.

Налаштували симулятор на задані параметри. У інтерактивному режимі роботи симулятора визначили масштаби візуалізації та при заданому значенні оптичної щільності  $D = 2,5$  одиниць отримали результати моделювання градаційних характеристик для типових варіантів цифрових зображень темних тонів (рис. 2).

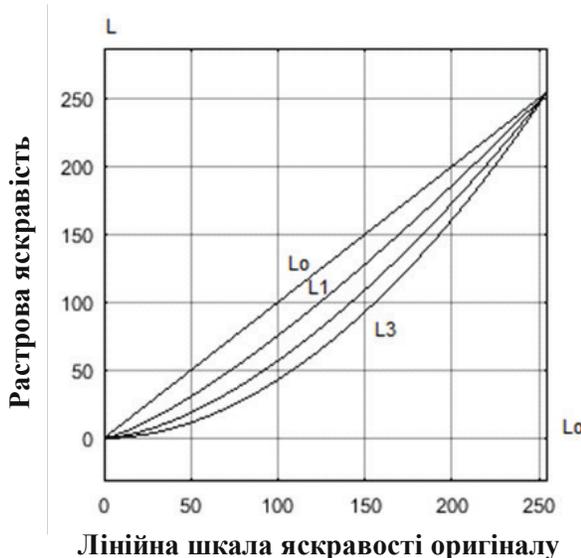


Рис. 2. Градаційні характеристики для типових варіантів растрування темних тонів зображень

Для порівняння на рисунку подана характеристика лінійної шкали  $L_0$ . Градаційні характеристики мають вигляд кривих, рівномірно розтягнутих у сторону темних тонів. На початку діапазону їхня крутизна є малою, що становить причину неякісного розрізнення темних деталей зображень. На середньому діапазоні кривизна характеристик поступово збільшується та в кінці інтервалу стає найбільшою. Отже, деталізація світлих тонів є на достатньому рівні.

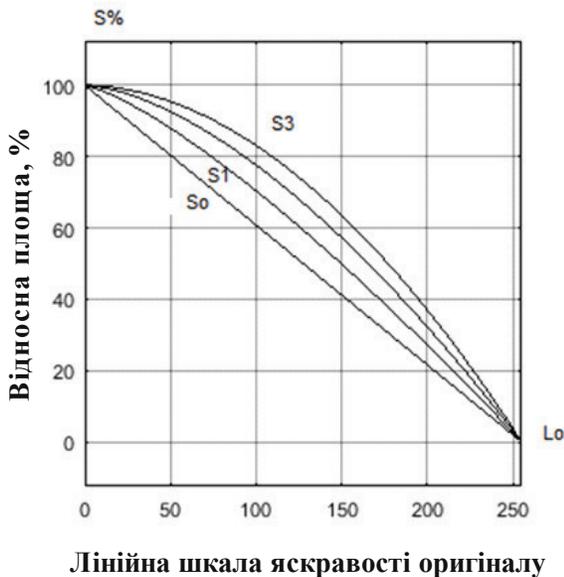


Рис. 3. Графіки растрового перетворення темних тонів зображень, виражені відносною площею у відсотках

Результати моделювання растрового перетворення для типових варіантів зображення темних тонів, виражені відносною площею растрових елементів у відсотках подані на рис. 3. Нижня характеристика відповідає лінійному растровому перетворенню  $S_0$ . Початкові значення відносної площі становлять 100 відсотків. На початку діапазону крутизна характеристик є малою. При  $L_0 = 100$  рівнів, відносні площі, виражені у відсотках становлять:  $S_1 = 70,4$ ;  $S_2 = 77,6$ ;  $S_3 = 83$  проценти. На середньому і світлому діапазонах крутизна характеристики растрування поступово зростає до максимуму кінці м інтервалу, внаслідок чого добре розрізняються деталі зображень на середніх та світлих ділянках зображення.

Отже, характеристика растрування, виражена відносною площею у відсотках, є носієм інформації, що кількісно і якісно описує растровий тон цифрових зображень, що є істотною перевагою.

Результати моделювання растрової оптичної щільності типових варіантів зображень темних тонів подані на рис. 4.

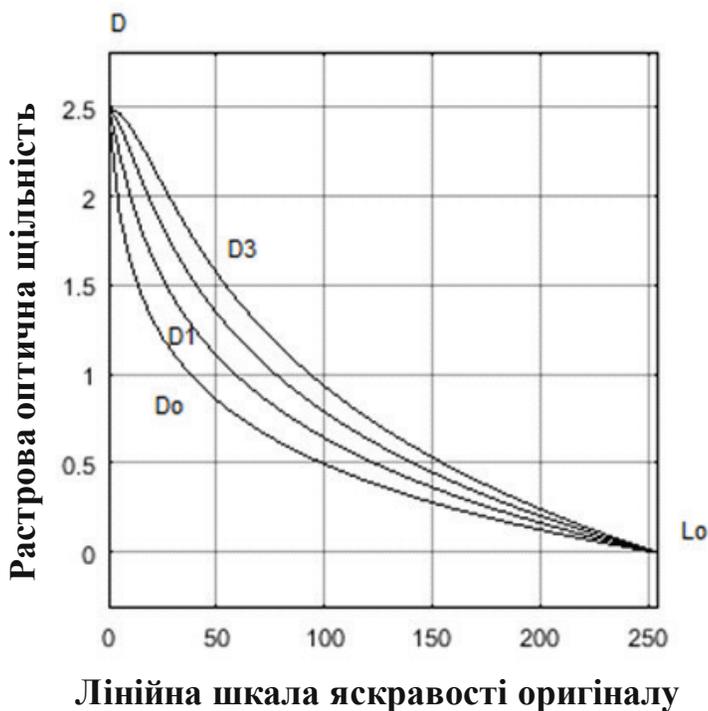


Рис. 4. Графіки растрової оптичної щільності для типових варіантів темних тонів зображень

Початкові значення растрової оптичної щільності  $D_r = 2,5$  одиниць. Знизу розташована характеристика оптичної щільності  $D_0$  лінійної шкали. Наступні графіки розташовані вище, що відповідає темним тонам зображення. Характеристики оптичної щільності типових варіантів темних тонів зображення є сильно вгнутими кривими на початку діапазону. При  $L_0 = 50$  рівнів растрова оптична щільність

становить:  $D_{r1} = 1,11$ ;  $D_{r2} = 1,36$ ;  $D_{r3} = 1,57$  одиниць. Натомість при  $L_0 = 100$  рівнів сірого растрового оптична щільність значно зменшилась і становить:  $D_{r1} = 0,646$ ;  $D_{r2} = 0,789$ ;  $D_{r3} = 0,93$  одиниць. На середніх і світлих тонах растрового оптична щільність швидко зменшується і в кінці інтервалу прямує до нуля.

Для порівняння у табл. 1 подано растровий тон, який виражений відносною площею у відсотках і растрового оптична щільність на інтервалі тонопередачі.

Таблиця 1

**Значення величини растрового тону у відсотках відносної площі і растрової оптичної щільності на інтервалі тонопередачі**

Площа і растрового оптичної щільності	Кількість рівнів сірого $L_0$						
	0	50	100	150	200	250	255
$S_1, \%$	100	87,9	70,4	49,8	27,1	2,54	0
$D_{r1}$	2,5	1,111	0,64	0,36	0,16	0,04	0,00
$S_3, \%$	100	95,5	83,1	63,5	36,9	3,09	0,00
$D_{r3}$	2,5	1,57	0,93	0,53	0,24	0,014	0,00

Растровий тон, що виражений відносною площею у відсотках, характеризується великими значеннями на ділянках темних і середніх тонів, а в кінці інтервалу швидко прямує до нульового значення, яке відповідає сприйняттю зображення зоровою системою людини. Натомість, денситометричними вимірюваннями одержується растрового оптична щільність, яка визначається логарифмічним виразом:

$$D_r = \lg \frac{S_0 \%}{S \%} = \lg \frac{100}{S}. \quad (12)$$

Наприклад, якщо  $S = 10 \%$ , то значення растрової щільності  $D_r = 1,0$ . Якщо  $S = 1 \%$ , то  $D_r = 2,0$ . Логарифмічні характеристики растрової оптичної щільності (рис. 4) є протилежними до характеристик растрового тону (рис. 3). Оптична щільність не є адекватною величиною у тонових градаціях для людської зорової системи. Зорова оцінка тональності растрового зображення є відносно лінійною, що суперечить принципам денситометричних вимірювань. Денситометрія дозволяє із коректністю оцінити площу растрових елементів не тільки внаслідок розсіювання світла, але й тому що логарифмічна характеристика рис.4 не відповідає сприйняттю тональності людиною. Абсолютна похибка оцінювання відносної площі растрових елементів у середніх тонах може сягати 20% [8].

Запропоноване растрове перетворення зображення, подане відносною площею елементів та виражене у відсотках, що розширює функціональні можливості приготування зображень до друкування.

**Висновки.** 1. Розроблено математичну модель растрового тону, подану відносною площею растрових елементів, вираженою у відсотках та растровою оптичною

щільністю цифрових зображень темних тонів для типових варіантів тоновідтворення і визначено їх параметри.

2. Розроблено структурну схему моделі симулятора растрування в пакеті MATLAB: Simulink, за допомогою якого побудовані градаційні характеристики вхідних цифрових зображень, показники растрування, які виражені відносною площею растрових елементів у відсотках, розрахована растрова щільність та досліджені властивості цих характеристик.

3. Подано результати імітаційного моделювання. Градаційні характеристики типових варіантів цифрових зображень темних тонів рівномірно розтягнуті у сторону ділянки темних тонів. На початку діапазону їхня крутизна не велика, що свідчить про погане розрізнення темних деталей зображень. На середньому діапазоні кривизна характеристик поступово збільшується, тому деталі світлих тонів розрізняються добре.

4. Побудовано графіки показника растрового перетворення типових варіантів зображень, виражених відносною площею у відсотках. Початкові значення відносною площі становлять 100 відсотків. На початку діапазону характеристики мають малу крутизну і при  $L_0 = 100$  рівнів відносні площі становлять:  $S_1 = 70,4$ ;  $S_2 = 77,6$ ;  $S_3 = 83$  відсотки, а при  $L_0 = 150$  рівнів відносні площі становлять:  $S_1 = 49,8$ ;  $S_2 = 57,5$ ;  $S_3 = 63,5$  відсотків. Отже, на початку і середині діапазону відносна площа є досить великою, що відповідає сприйняттю тону зображення зоровою системою людини.

5. Побудовано графіки растрової оптичної щільності типових варіантів темних тонів зображень, початкові значення яких становлять  $D_r = 2,5$  одиниць і на початку діапазону є вгнутими кривими. Встановлено, що при  $L_0 = 50$  рівнів оптична щільність становить:  $D_{r1} = 1,11$ ;  $D_{r2} = 1,36$ ;  $D_{r3} = 1,57$  одиниць та швидко зменшується і при  $L_0 = 100$  рівнів уже становить:  $D_{r1} = 0,646$ ;  $D_{r2} = 0,789$ ;  $D_{r3} = 0,93$  одиниць. На середніх і світлих діапазонах оптична щільність швидко зменшується і прямує до нульового значення.

6. Встановлено, що оптична щільність растрових градацій цифрових зображень не є адекватною логарифмічною характеристикою для опису їхнього сприйняття зором людини. Зорова оцінка тональності растрового зображення є відносно лінійною, що суперечить принципам денситометричних вимірювань.

7. Результати проведених досліджень рекомендовані для застосування при раструванні цифрових зображень на стадії підготовки зображень у комп'ютерних видавничих системах.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Барановський І. В., Яхимович Ю. Я. Поліграфічна переробка образотворчої інформації: навч. посібник. – Київ-Львів: ІЗМН, 1998, 400 с.
2. Гавриш Б. М., Дурняк Б. В., Тимченко О. В., Ющик О. В. Відтворення зображень растровими скануючими пристроями: навч. посібник. Львів: УАД, 2016. 180 с.
3. Блантер Д., Флейшман Г., Рот С. Сканування та растрування зображень. Е: ЕКОМ, 1999. 384 с.

4. Гунько С.М. Основи поліграфії: навч. посібник. – Львів: УАД, 2013. 259 с.
5. Лотошинська Н.Д., Івахів О.В. Теорія кольору та кольорознавства: навч. посібник. – Львів: Видавництво львівської політехніки, 2014. 204 с.
6. Луцків М.М. Цифрові технології друкарства: моног. – Львів: УАД, 2012. 488 с.
7. Мартинюк В. Т., Основи додрукарської підготовки образотворчої інформації: Кн.2. Основи опрацювання образотворчої інформації: підручник. – Київ: Університет «Україна», 2009, 291 с.
8. Пашуля П. Л. Стандартизація, метрологія, відповідність, якість у поліграфії: підручник. – Львів: УАД, 2021, 408 с.
9. Гунько Д. Т. Моделювання нормованого растрового перетворення для елементів квадратної форми: Кваліологія: Зб. наук. праць, Львів: УАД, 2020, №2(38), 160-169 с.
10. Луцків М.М., Гунько Д.Т. Моделювання нормованого растрового перетворення для елементів круглої форми: Поліграфія і видавнича справа: Зб наук. праць., Львів: УАД, 2020, №2(80), 116-123 с.
11. Kavyn S. Development of a model of power-linear conversion of digital images for dark tones technology audit and production reserves — no. 2/2(82), 2025.
12. Янчинський А. В. Нормоване растрове степеневе перетворення цифрових зображень. Кваліологія книги. – Львів: УАД, 2023, №2 (44). 26-35 с.
13. Луцків М.М., Барановський І.В., Янчинський А.В. Моделювання нормованого степеневого растрового перетворення. Кваліологія книги. – Львів: УАД, 2024, №1 (45). 7-17 с.
14. Янчинський А. В. Моделювання нафарблення растрове перетворених цифрових зображень темних тонів. - Поліграфія і видавнича справа – Львів: УАД, 2024 №2 (88) 41-49 с.
15. Янчинський А. В. Моделювання нафарблення растрове перетворених цифрових зображень світлих тонів. - Наукові записки – Львів: УАД, 2024 № 2 (69) 120-129 с.
16. Янчинський А. В. Низькочастотне фільтрування степеневого перетворення світлих тонів зображень. - Наукові записки – Львів: УАД, № 1 (68) 145-152 с.
17. Луцків. М. М., Барановський І. В., Янчинський А. В. Аналіз тоновідтворення світлих друківаних растрових зображень на основі розрахунку їх оптичної щільності - Поліграфія і видавнича справа / printing and publishing / 1 (87) 2024 стор. 106-114.

#### REFERENCES

1. Baranovsky I. V., Yakhymovych Yu. P. Processus imprimendi informationes visuales: doceo. manuale. – Kyiv-Lviv: IZMN. 1998, 400 p.
2. Gavrish B. M., Durnyak B. V., Timchenko O. V., Yushchuk O. V. Reproduction Image reproduction with raster technis: tutorial. manuale. Leopoldis: UAD, 2016. 180 p.
3. Blanter D., Fleishman G., Roth S. Scanning and rasterizing images. E: ECOM, 1999. 384 p.
4. Gunko S. M. Fundamenta imprimendi: doceo. manuale. – Leopoldis: UAD. 2013. 259p.
5. Lotoshynska N. D., Ivakhiv O. V. Color theoria et color scientia: doceo. manuale. – Leopoldis: Leopoldis Polytechnic Publishing Domus. 2014. 204 p.
6. Lutskiv M. M. Digital technologiae excudendi: monograph. – Leopoldis: UAD, 2012. 488 p.
7. Martyniuk V. T., Fundamenta preprint praeparationis informationis visualis: Liber 2. Fundamenta processus informationis visualis: textbook. – Kyiv: Universitas Ucraina, 2009, 291 p.

8. Pashulya P. L. Standardisatio, metologia, obsequium, qualitas imprimendi: artem. – Leopoldis: UAD, 2021, 408 p.
9. Hunko D. T. Modeliuvannia normovanoho rastrovoho peretvorennia dlia elementiv kvadratnoi formy: Qualiology: collection of scientific papers, Lviv: UAP, 2020, №2(38), 160-169 p.
10. Lutskiv M. M., Hunko D. T. Modeliuvannia normovanoho rastrovoho peretvorennia dlia elementiv kruhloi formy: Polihrafiia i vydavnycha sprava: 38, scientific work, Lviv: UAP, 2020, №2(80), 116-123 p.
11. Kavyn S. Development of a model of power-linear conversion of digital images for dark tones technology audit and production reserves — no. 2/2(82), 2025.
12. Yanchynskyi A.V. Normovane rastrove stepeneve peretvorennia tsyfrovyykh zobrazhen. Qualiology of the Book. – Lviv: UAD, 2023, No. 2 (44). pp. 26-35.
13. Lutskiv M. M., Baranovskyi I. V., Yanchynskyi A. V. Modeliuvannia normovanoho stepenevoho rastrovoho peretvorennia. Qualiology of the Book. – Lviv: UAD, 2024, No. 1 (45). pp. 7-17.
14. Yanchynskyi A. V. Modeliuvannia nafablennia rastrove peretvorennykh tsyfrovyykh zobrazhen temnykh toniv. Polihrafiia i vydavnycha sprava. – Lviv: UAD, 2024, No. 2 (88). pp. 41-49.
15. Yanchynskyi A. V. Modeliuvannia nafablennia rastrove peretvorennykh tsyfrovyykh zobrazhen svitlykh toniv. Collection of Scientific Works. – Lviv: UAD, 2024, No. 2 (69). pp. 120-129.
16. Yanchynskyi A.V. Nyzkhochastotne filtruvannia stepenevoho peretvorennia svitlykh toniv zobrazhen. Collection of Scientific Works. – Lviv: UAD, No. 1 (68). pp. 145-152.
17. Luckiv. M. M., Baranovskyi I. V., Yanchynskyi A. V. Analiz tonovidtvorennia svitlykh drukovanykh rastrovyykh zobrazhen na osnovi rozrahunku yih opychnoyi gusyny Poligrafii i vydavnychoi sprava / printing and publishing / 1 (87) 2024 pp. 106-114.

doi: 10.32403/0554-4866-2025-2-90-184-195

## MODULATION OF RASTER TONE AND OPTICAL DENSITY OF IMAGES

A. V. Yanchynsky

*National University «Lviv Polytechnic»  
12 S. Bandery St., Lviv 79013, Ukraine*

*A mathematical model of the raster tone index expressed by the relative area of raster elements in percent and the raster optical density of digital images for different tone reproduction options in the areas of the tone interval is developed.*

*In the MATLAB: Simulink panel, a structural diagram of the simulator model is developed to determine the characteristics of raster tones and, in particular, the tone index given by the relative area of raster elements in percent, depending on the selected tone interval and the integral density corresponding to it. Gradation characteristics of the input image reproduction, raster tone characteristics and optical density are constructed, and their analysis is carried out. The results of simulation modeling are presented in the form of a family of curves for typical options regarding the gradation*

*characteristics of different tonalities, raster tone indices in percent and raster optical densities corresponding to them, and their properties are analyzed.*

*It has been established that the tone indicators of raster elements, expressed as a percentage of their relative area, allow us to quantitatively assess the optical density after image rasterization and make a decision on adjusting the process to improve the quality of printed products.*

**Keywords:** *digital images, simulation model, gradation characteristics, rasterization, tone indicator, optical density, simulation, properties, quality.*

*Стаття надійшла до редакції 12.09.2025.*

*Received 12.09.2025.*