

УДК 655.226

**АНАЛІЗ ТОНОВІДТВОРЕННЯ СВІТЛИХ ДРУКОВАНИХ РАСТРОВИХ
ЗОБРАЖЕНЬ НА ОСНОВІ РОЗРАХУНКУ ЇХ ОПТИЧНОЇ ГУСТИНИ**

М. М. Луцків, І. В. Барановський, А. В. Янчинський

*Українська академія друкарства,
вул. Під Голоском, 19, Львів, 79020, Україна*

Розглянуто типові варіанти застосування традиційного ступеневого растрового перетворення світлої ділянки друкованого зображення, на основі формули Юла-Нільсена визначено характеристики оптичної густини, а також показники демодуляції і контрастної чутливості тоновідтворення. Методом об'єктно-орієнтованого програмування у пакеті MATLAB: Simulink розроблено структурну схему моделі симулятора тоновідтворення друкованих зображень, за допомогою якого виконано розрахунок оптичної густини, побудовані типові характеристики растрівання і встановлено контрастну чутливість.

З результатів імітаційного моделювання випливає, що типові градаційні характеристики растрівання виглядають випуклими кривими і що при зменшенні показника ступеня відбувається їх розтягування. Встановлено також, що на початку світлого діапазону характеристики оптичної густини мають досить значну крутизну і є легко вгнутими скупленими кривими.

Велика початкова крутизна характеристики оптичної густини викликає стрибки контрастної чутливості, початкові значення яких становлять від 4,8 до 2,5 одиниць, після яких вони стають вгнутими кривими, які прямують до кінцевих значень від 3,14 до 7,08 одиниць. Потрібно зауважити, що наявність таких стрибків спричиняє постеризацію — помітні переходи, що спотворюють зображення, а тому потребують додаткового фільтрування зображення.

Ключові слова: *растрове перетворення, цифрове зображення, характеристики растрівання, контрастна чутливість, демодуляція, моделювання, оптична густина, симулятор, оцінки тоновідтворення.*

Постановка проблеми. Під час підготовки цифрових зображень до друку застосовують різні методи перетворення і коригування зображень у комп'ютерних видавничих системах. У більшості випадків оператор (дизайнер, технолог), який здійснює коригування, не має оригіналу і в робочому вікні комп'ютерної графіки Photoshop чи іншій спостерігає цифрове зображення, яке відтворюється на чорному тлі монітора. Воно відрізняється від паперового способом формування і по-іншому сприймається зоровою системою людини. Тому якість коригування залежить від знань, вміння, досвіду і майстерності дизайнера і є тільки наближено оптимальною. Потрібно зауважити, що в програмах комп'ютерної графіки не передбачені опції для побудови градаційних характеристик та оптичної густини,

тому у дизайнера недостатньо інформації про зображення, що також обмежує його можливості щодо якісної підготовки зображення до друку.

Традиційні класичні методи аналізу і синтезу тоновідтворення зображень основані на оптичній густині, яку визначають за формулою Юла-Нільсена [1, 9], за умови, що відносна площа растрових елементів лінійно змінюється в межах $0 \leq S \leq 1$. Отже, побудована характеристика оптичної густини відповідає стандартному тестовому тоновідтворенню, оскільки тональність зображення змінюється в широких межах. Тому аналіз тоновідтворення світлих друкованих зображень на основі оптичної густини і відносної площі растрових елементів є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У різних галузях науки і техніки застосовують різні методи цифрової обробки зображень [2, 10, 11]. Поліграфія має свої особливості, що зумовили розробку і застосування методів і перетворень у просторовій області, зокрема яскравісні перетворення, які умовно ділять на логарифмічні, степеневі гама-перетворення та функціональні перетворення, що подані відповідними класами функцій [2, 3, 4, 10].

Традиційні класичні методи аналізу тоновідтворення друкованих зображень основані на відносній площі растрових елементів S і оптичній густині D_r , яка є основним носієм інформації, яку визначають на основі формули Юла-Нільсена, яку можна подати таким виразом:

$$D_r = F(D_\phi, D_\Pi, S, n), \quad (1)$$

де D_Π — оптична густина шару фарби плашки; D_0 — оптична густина паперу; S — відносна площа растрових елементів; n — коефіцієнт, який враховує вплив лініатури растра і якості паперу на демодуляцію.

Зауважимо, що визначення і узгодження цих характеристик є доволі складною процедурою [1, 7, 10]. Вважають, що формула Юла-Нільсена не дає достатньої точності, однак доступні джерела не містять про це достатньої інформації. Дослідження відтворення друкованих зображень, які подані у [1, 3, 9], зводяться до обчислень і побудови характеристики оптичної густини за умови, що відносна площа растрових елементів лінійно змінюється в межах $0 \leq S \leq 1$. Отже, побудована характеристика оптичної густини відповідає відтворенню лінійної шкали, за якою «на око» оцінюють тоновідтворення і цим обмежуються всі можливості.

Для кількісної оцінки якості відбитка використовують контраст друку, який визначається за коефіцієнтом Ширмера [6, 9]:

$$K = (D_\Pi - D_r) / D_\Pi \cdot 100\%, \quad (2)$$

де D_Π — оптична густина плашки і D_r — інтегральна оптична густина растрової ділянки контрольної шкали.

Коефіцієнт контрасту визначається за зональними оптичними густинами відбитка 100 % і 80 % елементів шкали. Його величина залежно від виду паперу і для крейдового глянцевого паперу $K = 0,50 \pm 0,04$, для крейдованого — 0,43 і для некрейдованого — 0,25. Нульове значення коефіцієнта контрасту засвідчує повну втрату градацій у темних ділянках зображення [6, 9]. На сучасних вимірювальних приладах (денситометрах) коефіцієнт контрасту розраховується автоматично.

Мета статті — проаналізувати тоновідтворення світлих друкованих растрових зображень на основі розрахунку за формулою Юла-Нільсена для трьох типових варіантів степеневого перетворення, розробити структурну схему моделі симулятора, подати результати імітаційного моделювання характеристик растрового перетворення, оптичної густини і контрастної чутливості.

Виклад основного матеріалу дослідження. У традиційному класичному методі тоновідтворення друкованих зображень застосовують демодуляцію растрового перетворення, у якому основним носієм інформації про зображення є відносна площа [1, 2, 11]. Сучасні цифрові методи аналізу і коригування тоновідтворення ґрунтуються на степеневому гама-перетворенні, яке є стандартом для пристроїв вводу інформації (папір, камера) і виводу (монітор, принтер) [8, 9, 10]. Тому для розв'язку поставленої задачі аналізу тоновідтворення друкованих зображень застосуємо степеневе гама-перетворення. З огляду на викладене, застосуємо степеневе перетворення для формування відносної площі растрових елементів.

$$S = S_0^r, \text{ якщо } 0 \leq S_0 \leq 1, \quad (3)$$

де r — показник степеня перетворення.

Якщо показник степеня менший ніж одиниця, то характеристика перетворення розтягується, а коли більший ніж одиниця, то стискається. Зауважимо, що початкові значення ($S = 0$) та кінцеві значення ($S = 1$) залишаються незмінними. На основі викладеного сформуємо три типові варіанти степеневого перетворення площі растрових елементів для світлих тонів:

$$S_1 = S_0^{0,5}; S_2 = S_0^{0,6}; S_3 = S_0^{0,8}, \text{ якщо } 0 \leq S_0 \leq 1. \quad (4)$$

На основі формули Юла-Нільсена визначимо растрову густину D_r для трьох варіантів степеневого перетворення (4):

$$D_{r1} = -n \lg \left[S_1 \cdot 10^{-\frac{D_\phi}{n}} + (1 - S_1) \cdot 10^{-\frac{D_\pi}{n}} \right], \quad (5)$$

$$D_{r2} = -n \lg \left[S_2 \cdot 10^{-\frac{D_\phi}{n}} + (1 - S_2) \cdot 10^{-\frac{D_\pi}{n}} \right], \quad (6)$$

$$D_{r3} = -n \lg \left[S_3 \cdot 10^{-\frac{D_\phi}{n}} + (1 - S_3) \cdot 10^{-\frac{D_\pi}{n}} \right], \quad (7)$$

де S_1, S_2, S_3 — відносні площі типових варіантів степеневого перетворення; D_ϕ — оптична густина шару фарби плашки; D_π — оптична густина паперу; n — коефіцієнт, що враховує вплив якості паперу і лініатури растра на демодуляцію.

Щоб більш повно оцінити властивості тоновідтворення зображення, визначили їх контрастну чутливість як похідну від характеристики оптичної густини.

$$C = dD_r / dS, \text{ якщо } 0 \leq D_r \leq D_{max}. \quad (8)$$

З використанням об'єктно-орієнтованого програмування у пакеті MATLAB: Simulink на основі викладеного і виразів (3) – (8) розраховані і побудовані характеристики оптичної густини та контрастної чутливості для типових варіантів степеневого перетворення. У вікні моделі із операційних блоків бібліотек на основі

викладеного розробили структурну схему моделі симулятора тоновідтворення друкованих зображень, схема якого подана на рис. 1.

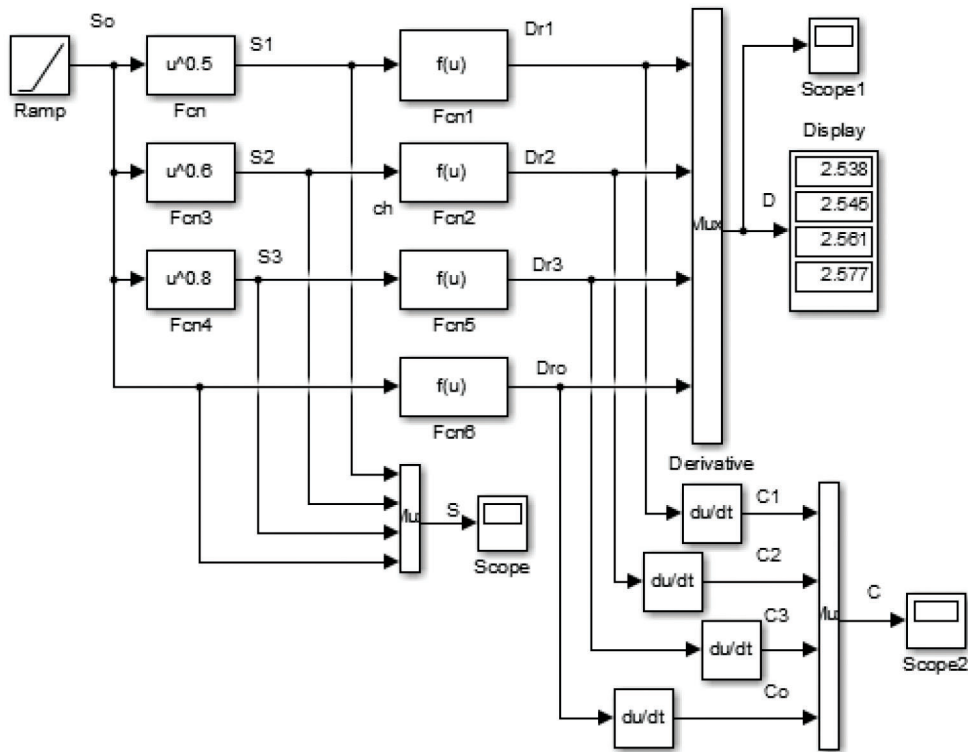


Рис. 1. Структурна схема моделі симулятора тоновідтворення друкованих зображень

Операційний блок Ramp генерує лінійну растрову шкалу S_0 , яка паралельно подається на входи першого стовпця операційних блоків математичних функцій F_{cn} , у діалогових вікнах записано програми для обрахунку виразів (4) типових варіантів степеневого перетворення площі растрових елементів для трьох показників степеня. Обчислені площі растрових елементів S_1, S_2, S_3 подаються на вхід мультиплекса MUX і візуалізуються блоками Scope. Обчислені площі растрових елементів паралельно подаються на входи операційних блоків математичних функцій другого стовпця, у діалогових вікнах яких записані програми-вирази (5) – (7) для обчислення оптичних густин D_{r1}, D_{r2}, D_{r3} , які подаються на вхід наступного мультиплекса і візуалізуються блоками Scope1 і Display1. Для порівняння додатково у схему введено блок F_{cn0} для визначення оптичної густини D_0 — лінійної шкали S_0 .

Для визначення контрастної чутливості тоновідтворення зображень застосовано блоки диференціювання Derivative, виходи яких C_0, C_1, C_2, C_3 подаються на мультиплекс і візуалізуються блоком Scope2. Симулятор налаштований на задані показники степеня $r = 0,5; 0,6; 0,8$ і оптична густина на коефіцієнт $n = 3$. Результати імітаційного моделювання характеристик растрування S_0, S_1, S_2, S_3 подані на рис. 2.

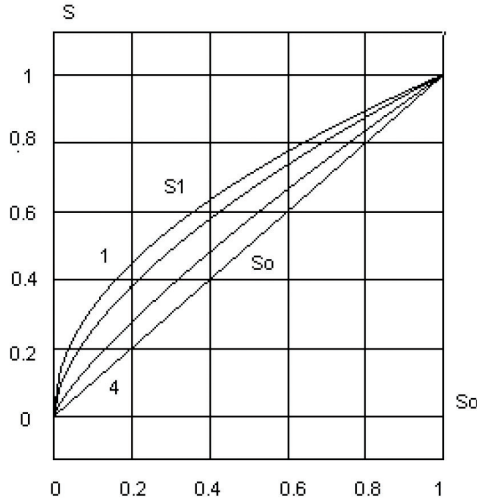


Рис. 2. Характеристики растрування для типових варіантів степеневого перетворення

Для порівняння на рисунку подана характеристика лінійної растрової шкали S_0 . Характеристики растрування є випуклими кривими, початкові значення яких дорівнює нулеві, а кінцеве — одиниці. Зменшення показника степеня зсуває характеристику вгору. Перша верхня характеристика S_1 відповідає показнику степеня $r = 0,5$, нижня S_3 — показнику степеня $r = 0,8$. Зауважимо, що саме форма кривої є основним носієм інформації зображення.

Результати моделювання растрової оптичної густини зображення для типових варіантів степеневого перетворення подані на рис. 3.

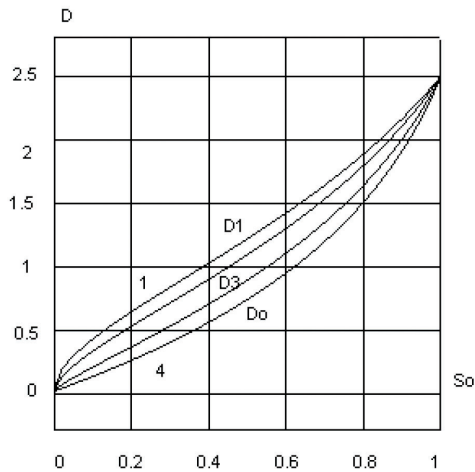


Рис. 3. Графіки растрової оптичної густини зображень типових варіантів степеневого перетворення

Звернемо увагу, що на початку діапазону на світлих тонах характеристики мають досить велику крутизну, яка швидко зменшується. Особливо велику крутизну має перша і друга криві, які відповідають показнику степеня $r = 0,5$ і $r = 0,6$. Після чого характеристики оптичної густини є легко вгнутими скупченими кривими і прямують до кінцевого значення 2,504 одиниць. Порівнюючи характеристики оптичної густини із характеристиками растрового перетворення (рис. 2), доходимо висновку, що оптична густина повною мірою відповідає відносній площі растрових елементів. Нижня крива D_0 відповідає лінійній шкалі S_0 , розташованій знизу, і найбільш розсвітлює зображення. Натомість верхня крива D_{r1} відповідає показнику степеня $r = 0,5$ — найбільше притемнює зображення.

Звернемо увагу, що велика крутизна характеристики оптичної густини унеможливує визначення контрастної чутливості за допомогою стандартного блоку диференціювання Derivative. Для того щоб оцінити контрастну чутливість на цьому інтервалі, було обрано початкове значення відносної площі $S_0 = 0,001$ одиниць, який задали у блоці Ramp. Зауважимо, що обтинання початкового і кінцевого діапазону використовували для поліпшення коригування [7, 11]. Результати імітаційного моделювання контрастної чутливості подані на рис. 4.

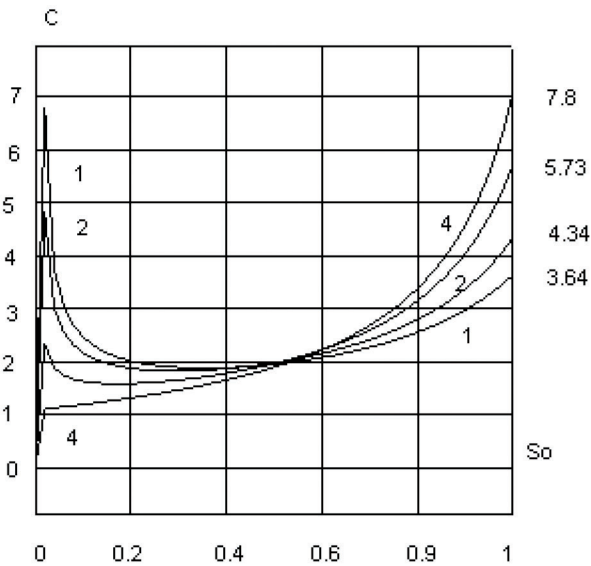


Рис. 4. Графіки контрастної чутливості оптичної густини

На початку діапазону відбувається стрибок контрастної чутливості, пікове значення яких залежить від показника степеня r . Найбільше пікове значення становить 6,5 одиниць та відповідає показнику степеня $r = 0,5$, наступні пікові значення становлять 4,8 та 2,5 одиниць і відповідають показникам степеня 0,7 та 0,8. Після пікових значень характеристики контрастної чутливості швидко зменшується в околі $S_0 = 0,55$, перетинаються легко вгнутими кривими і прямують до кінцевих значень 3,64; 4,34; 5,75; 7,08 одиниць. Отже, за межами стрибків чутливість плавно

змінюється в широких межах, тому зображення добре сприймається зоровою системою людини. Зазначимо, що контрастна чутливість одиначної шкали немає стрибка і плавно змінюється від 0,0 до 7,08 одиниць.

Зауважимо, що наявність стрибків контрастної чутливості спричиняє постеризацію — помітні світлові переходи, що спотворюють зображення, а тому потребує додаткового фільтрування зображення [5, 9].

Результати дослідження можна використати у програмах комп'ютерної графіки для вибору оптимальної градаційної характеристики друкованих зображень під час їх підготовки до друку.

Висновки. Розроблено три типові варіанти степеневого растрового перетворення, яке дає змогу на основі формули Юла-Нільсена визначити демодуляцію растрового перетворення, типові характеристики растрового перетворення, оптичну густину і контрастну чутливість, визначено реальні кількісні оцінки їх властивостей. Розроблено структурну схему моделі тоновідтворення друкованих зображень в пакеті MATLAB:Simulink, який паралельно розраховує і буде типові варіанти характеристик степеневого перетворення, оптичної густини і контрастної чутливості.

Встановлено, що характеристики растрування — випуклі криві, початкові значення яких дорівнюють нулеві, кінцеві — одиниці. Визначено, що зменшення показника степеня зсуває характеристику вгору і ліворуч. Верхня характеристика S_1 відповідає показнику степеня $r = 0,5$, нижня S_3 — $r = 0,8$.

Встановлено, що на початку діапазону на світлих тонах графіки оптичної густини зображень мають досить високу крутизну, яка швидко зменшується, після чого характеристика густини є легко вгнутими скупченими кривими і прямують до кінцевих значень 2,5040 одиниць. Порівнюючи характеристики оптичної густини із характеристиками растрового перетворення, дійшли висновку, що оптична густина певною мірою відповідає відносній площі растрових елементів. Нижня крива D_0 відповідає лінійній шкалі S_0 , розташована знизу і найбільш розсвітлює зображення. Натомість верхня крива D_{r1} відповідає показнику степеня $r = 0,5$ та найбільше притемнює зображення.

Доведено, що велика початкова крутизна характеристики оптичної густини викликає стрибок контрастної чутливості, пікове значення якого залежить від показника степеня. Найбільше пікове значення становить 6,5 одиниць та відповідає показнику степеня $r = 0,5$. Наступні пікові значення становлять 4,8 та 2,5 одиниць. Після пікових значень характеристики контрастної чутливості швидко зменшуються і в околі $S_0 = 0,55$ перетинаються, є злегка вгнутими кривими та прямують до кінцевих значень 3,64; 4,34; 5,75 і 7,08 одиниць. Зауважимо, що наявність стрибків контрастної чутливості викликає постеризацію — помітні переходи, що спотворюють зображення.

Доведено, що застосування традиційного степеневого гама-перетворення для коригування тоновідтворення друкованих зображень спричиняє постеризацію, що спотворює зображення та обмежує його можливості щодо коригування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Барановський І. В., Яхимович Ю. Я. Поліграфічна переробка образотворчої інформації : навч. посіб. Київ-Львів : ІЗМН, 1998. 400 с.
2. Воробель Р. А. Логарифмічна обробка зображень. Київ : Науково-виробниче підприємство «Видавництво «Наукова думка» НАН України», 2012. 232 с.
3. Луцків М. М., Малачівський, Гук І. Б., Федина В. Б., Шевчук О. В. Інформативність демодуляції растрового перетворення. Комп'ютерні технології друкарств. 2022. № 1 (47). С. 123–133.
4. Луцків М. М. Цифрові технології друкарства : монографія. Львів : УАД, 2016. 488 с.
5. Мартинюк В. Т. Основи додрукарської підготовки образотворчої інформації: Основи опрацювання образотворчої інформації : підруч. Київ : Університет «Україна», 2009. 292 с.
6. Предко Л. С. Проектування додрукарських процесів : навч. посіб. Львів : УАД, 2009. 352 с.
7. Ющик О. В. Основи цифрової обробки зображень : навч. посіб. Львів : УАД, 2009. 352 с.
8. Baczynski L. Skanery i skanowanie. Warszawa : Wydawnictwo Mikoma, 2005. 889 s.
9. Panak J., Ceppan M., Avonka V., Karpynski L., Kovdos P., Mikula M., Jakucewiz S. Poligrafia: procesy i technika. COBRPE. Warszawa, 2009. 278 s.
10. Gonzales C., Woods E. Digital image Processing: International Version 3rd Edition, Inc publishing as Prentice Hall. Copyright, 2008. 1104 p.
11. Donnie O'Quinn. Print Publishing Hayden Shop Manual. 201 103rd street, Indianapolis, Indiana, 2003. 590 p.

REFERENCES

1. Baranovskyi, I. V., & Yakhymovych, Yu. Ya. (1998). Polihrafichna pererobka obrazotvorchoi informatsii . Kyiv-Lviv : IZMN (in Ukrainian).
2. Vorobel, R. A. (2012). Loharyfmichna obrobka zobrazhen. Kyiv : Naukovo-vyrobnyche pidpriemstvo «Vydavnytstvo «Naukova dumka» NAN Ukrainy» (in Ukrainian).
3. Lutskiv, M. M., Malachivskyi, Huk, I. B., Fedyna, V. B., & Shevchuk, O. V. (2022). Informatyvnist demoduliatsii rastrovoho peretvorennia: Komp'uterni tekhnolohii drukarstv, 1 (47), 123–133 (in Ukrainian).
4. Lutskiv, M. M. (2016). Tsyfrovi tekhnolohii drukarstva. Lviv : UAD (in Ukrainian).
5. Martyniuk, V. T. (2009). Osnovy dodrukarskoi pidhotovky obrazotvorchoi informatsii: Osnovy opratsiuvannia obrazotvorchoi informatsii. Kyiv : Universytet «Ukraina» (in Ukrainian).
6. Predko, L. S. (2009). Proektuvannia dodrukarskykh protsesiv. Lviv : UAD (in Ukrainian).
7. Yushchuk, O. V. (2009). Osnovy tsyfrovoi obrobky zobrazhen. Lviv : UAD (in Ukrainian).
8. Baczynski, L. (2005). Skanery i skanowanie. Warszawa : Wydawnictwo Mikoma (in Polish).
9. Panak, J., Ceppan, M., Avonka, V., Karpynski, L., Kovdos, P., Mikula, M., & Jakucewiz, S. (2009). Poligrafia: procesy i technika. COBRPE. Warszawa (in Polish).
10. Gonzales, C., & Woods, E. (2008). Digital image Processing: International Version 3rd Edition, Inc publishing as Prentice Hall. Copyright (in English).
11. Donnie, O'Quinn. (2003). Print Publishing Hayden Shop Manual. 201 103rd street, Indianapolis Indiana, (in English).

doi: 10.32403/0554-4866-2024-1-87-106-114

ANALYSIS OF TONE REPRODUCTION OF LIGHT PRINTED RASTER IMAGES BASED ON THE CALCULATION OF THEIR OPTICAL DENSITY

M. M. Lutskiv, I. V. Baranovskyi, A. V. Yanchinskyi

*Ukrainian Academy of Printing,
19, Pid Holoskom St., Lviv, 79020, Ukraine
lutolen@i.ua,
ihbar@ukr.net*

Typical options for applying the traditional power raster transformation of the bright part of the printed image are considered, and on the basis of the Yule-Nielsen formula, the characteristics of the optical density, as well as the indicators of demodulation and contrast sensitivity of tone reproduction, are determined. Using the method of object-oriented programming in the MATLAB: Simulink package, a structural diagram of the model of the tone reproduction simulator of printed images is developed, with the help of which the calculation of the optical density is performed, the typical characteristics of rasterization are built, and the contrast sensitivity is established.

It follows from the results of simulated modeling that the typical gradation characteristics of rasterization look like convex curves and that their stretching occurs when the degree index decreases. It is also established that at the beginning of the light range, the characteristics of the optical density have a rather significant steepness and are slightly concave, lumped curves.

The large initial steepness of the optical density characteristic causes jumps in contrast sensitivity with initial values of 4.8 to 2.5 units, after which they become concave curves that lead to final values of 3.14 to 7.08 units. It should be noted that the presence of such jumps causes posterization – noticeable transitions that distort the image and therefore require additional filtering of the image.

Keywords: *raster transformation, digital image, raster characteristics, contrast sensitivity, demodulation, modeling, optical density, simulator, tone reproduction evaluations.*

Стаття надійшла до редакції 13.03.2024.

Received 13.03.2024.