

УДК 655.226

МОДЕЛЮВАННЯ ТОНОВІДТВОРЕННЯ ПРИ ДЕРАСТРУВАННІ З ЕЛЕМЕНТАМИ КРУГЛОЇ ФОРМИ

М. М. Луцків, І. Б. Гук, Б. І. Федина

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

Розроблено математичну модель тоновідтворення при дераструванні з елементами круглої форми, яка ґрунтується на основі формули демодуляції Юла-Нільсена, нормованого растрового перетвореннями і запропонованого локального контрасту. Побудовано структурну схему моделі симулятора демодуляції і контрасту в пакеті Matlab:Simulink, який дає можливість паралельно розраховувати і будувати градаційні характеристики тоновідтворення при демодуляції, характеристики локального контрасту і аналізувати властивості растрового тоновідтворення.

Подано результати імітаційного моделювання у вигляді градаційних характеристик демодуляції растрового перетворення, виражених растровими густинами, у яких відносна площа змінюється за лінійним і нелінійним алгоритмом растрування. Запропоновано оцінювати характеристику демодуляції відхиленням від лінійної, яка є синусоподібною кривою з мінімальним відхиленням $-9,177\%$ і максимальним значенням $+19,62\%$. Визначено локальний контраст тоновідтворення, який залежить від інтервалу тонопередачі, який для лінійного закону зміни площі поступово збільшується від 1,7 до 10,15 одиниць, а для нелінійної зміни знаходиться в межах від 0,71 до 10,63 одиниць на усьому інтервалі тонопередачі.

Ключові слова: моделювання, демодуляція, растрування, круглий елемент, симулятор, характеристики, локальний контраст, якість.

Постановка проблеми. Тоновідтворення — основна характеристика при друкуванні півтонових зображень. Тільки правильне відтворення градацій оригіналу на відбитку дає змогу отримати якісне зображення. Для оптимального формування градаційної характеристики тоновідтворення під час підготовки зображень до друку необхідно мати градаційну характеристику, виражену растровою густиною, яка залежить від закону зміни відносної площі на інтервалі тонопередачі, яка необхідна для коригування тоновідтворення для заданого друкарського процесу. Основним засобом контролю друкарського процесу в друкарнях є денситометр, оснований на вимірюванні оптичної густини плашок і контрольних растрових полів до візуального контролю. Денситометрія друкарських відбитків у більшості сучасних денситометрів здійснюється на основі формули демодуляції (дерастрування) Юла-Нільсена [1, 2, 3] і слугує для визначення растрової густини зображень від відносної площі друкарських елементів і оптичної густини шару фарби і паперу, за якими визначають відносний контраст друку, розтиск тощо [7, 8].

Якість тоновідтворення залежить від растрівання, яке визначається відносною площею растрових елементів, яка є основним носієм тону. Подана в літературних джерелах формула демодуляції Юла-Нільсена не регламентується законом зміни відносної площі растрових елементів на інтервалі тонопередачі, яка залежить від форми растрових елементів, та може бути різною і неповною мірою описує репродукційний процес. Тому моделювання демодуляція растрового перетворення для елементів круглої форми є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Формула Юла-Нільсена подана в низці монографій [1, 3] та інших, однак у них не подані результати розрахунків і побудови характеристик демодуляції, розтиску чи контрасту. У працях [1, 3] зазначено, що інформація, яка відтворюється різними друкарськими засобами, спотворюється здебільшого через розтиск друкарських елементів, який збільшує тон відбитка, — їх оптична густина майже завжди перевищує значення цього показника. Однак розтиск безпосередньо не фігурує у формулі демодуляції. На сьогодні якість поліграфічної продукції кількісно оцінюють за результатами вимірювань саме оптичної густини на різноманітних шкалах, нанесених на відбитку [7, 8]. Однак проблема вибору таких шкал та інтерпретація даних про їх оптичні властивості не є остаточно вирішена.

Ще одна важлива характеристика — відносний контраст, розрахований для площі $S=80\%$, оцінює відтворення зображень тільки у тінях, тому контраст вичерпно не характеризує відтворення різних тонів. Зокрема, на полі $S=40\%$ він може бути удвічі більший для світлих тонів. Викладене призвело до справедливої критики денсометричних методів некоректної їх оцінки для визначення контрасту, розтиску та інших факторів [2, 8].

У публікації [6] побудовані характеристики демодуляції для лінійної растрової шкали, які є вгнутими кривими, і подано їх аналіз.

Мета статті — розробити математичну модель тоновідтворення і симулятор дерастрування з елементами круглої форми, який дає можливість розраховувати і будувати градаційні характеристики демодуляції та локального контрасту і проаналізувати їх властивості.

Виклад основного матеріалу дослідження. Традиційним засобом задання тоновідтворення є градаційні характеристики, які описують залежність оптичної густини відбитка й оригіналу. Крім того, у градаційному перетворенні використовують характеристики растрівання і дерастрування, у яких фігурують відносні площі растрівання. Формула демодуляції (дерастрування) слугує для визначення растрової густини зображень залежно від відносної площі друкарських елементів і оптичних густин паперу, фарби та ґрунтується на основі формули Юла-Нільсена [1, 3, 8]

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

де D_ϕ — оптична густина фарбового шару плашки на відбитку; D_n — оптична густина паперу; D_r — растрова густина ділянки растрового зображення; S — відносна площа растрових елементів; n — коефіцієнт Юла-Нільсена, який враховує лініатуру растра.

Більшість державних стандартів, нормативів, контрольних шкал базуються на растрових елементах круглої форми [8]. Щоб узагальнити аналіз, застосуємо математичну модель нормованого растрового перетворення з областю визначення — замкнутим одиничним квадратом і множиною значень відносних площ — замкнутим одиничним інтервалом $[0,1]$ [4, 5]. У процесі растрового перетворення змінюються геометричні розміри колового елемента, подані радіусом, який змінюється в межах $[0 \leq x_n \leq 0,5]$, тоді функція градаційного перетворення — відносна площа круга для першого інтервалу

$$So1 = \pi x_n^2, \text{ якщо } 0 \leq x_n \leq 0,5, \quad (2)$$

де x_n — нормована просторова змінна (радіус); $0,5$ — половина сторони одиничного квадрата.

При подальшому збільшенні радіуса растрового елемента він втрачає форму кола, його поверхня поступово обмежується одиничним квадратом, а радіус кола прямує до свого максимального значення

$$x_M = 0,5\sqrt{2} = 0,707. \quad (3)$$

Тоді площа растрового елемента визначається площею фігури, яку відсікає одиничний квадрат від круга радіусом $0,5 \leq x_n \leq 0,707$, що виражена виразом [4, 5]

$$So1 = \pi x_n^2 - 4x_n^2 \arctg \sqrt{\frac{x_n^2}{0,5^2} - 1} + 4 + 0,5^2 \sqrt{\frac{x_n^2}{0,5^2} - 1}, \text{ якщо } 0,5 \leq x_n \leq 0,5\sqrt{2} = 0,707. \quad (4)$$

На основі (2) і (4) одержимо вираз нормованого растрового перетворення для елемента круглої форми

$$S_2 = \begin{cases} \pi x_n^2, \text{ якщо } 0 \leq x_n \leq 0,5 \\ \pi x_n^2 - 4x_n^2 \arctg \sqrt{\frac{x_n^2}{0,5^2} - 1} + 4 + 0,5^2 \sqrt{\frac{x_n^2}{0,5^2} - 1}, \text{ якщо } 0,5 \leq x_n \leq 0,707. \end{cases} \quad (5)$$

Для спрощення задачі розрахунку і побудови характеристики нормованого растрового перетворення (S) і градаційної характеристики демодуляції (1) застосовано об'єктно-орієнтоване програмування у популярному пакеті Matlab:Simulink, відповідно до виразів (5) і (1) розроблено структурну схему симулятора демодуляції і локального контрасту, схема якого подана на рис. 1.

Для повноти дослідження у верхній частині розташовані нормуючі блоки Gain, які формують лінійну градаційну характеристику демодуляції D_0 . Основними функціональними блоками схеми є блоки математичних функцій Fcn3 і Fcn4, у діалогових вікнах яких записана програма — формула Юла-Нільсена (1). Блок Ramp генерує лінійний геометричний розмір растрового елемента, який подається на входи блоків математичних функцій Fcn1 і Fcn2, у яких записана програма обчислення площі $So1$ і $So2$ відповідно до виразів (2) і (4). Блоки Step комотують виділені інтервали геометричних розмірів. На виході блока сумування одержується нормована площа растрового елемента $S2$. Для візуалізації результатів імітаційного моделювання застосовано блоки Scope і Display.

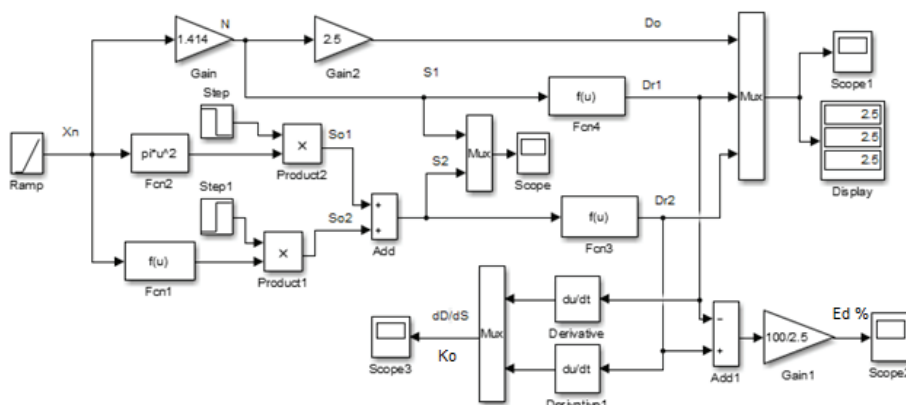


Рис. 1. Структурна схема симулятора демодуляції растрового перетворення з елементами круглої форми

Оскільки характеристики демодуляції растрового перетворення є нелінійними, тоді для оцінки властивостей демодуляції запропоновано визначати відхилення характеристики у відсотках

$$E = \frac{[D_r 2 - D_r 1]}{D_{rn}} 100\%, \quad (6)$$

де D_{rn} — максимальне значення густини.

Налагодимо симулятор на номінальну оптичну густину фарбового шару плашки $D_\phi = 2,5$, оптичну густину паперу $D_n = 0,02$ і коефіцієнт $n=3$. Результати імітаційного моделювання у вигляді характеристик нормованого растрового перетворення подані на рис. 2.

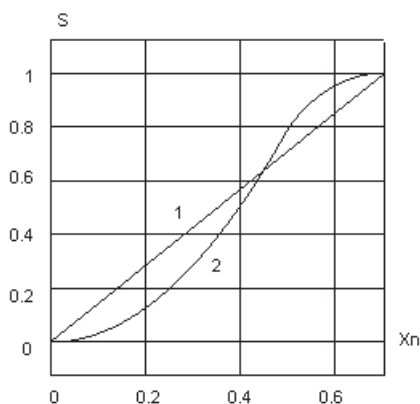


Рис. 2. Характеристика нормованого растрового перетворення для елементів круглої форми 1 і лінійного перетворення 2

Для порівняння на рис. 2 подана лінійна характеристика. Побудована характеристика растрового перетворення є S-подібною кривою. На початку діапазону характеристика розміщається нижче лінійної, пересікає лінійну і на другому діапазоні розміщається вище, а в кінці інтервалу прямує до одиниці. Результати моделювання відхилення характеристики нормованого растрового перетворення від лінійного подано у відсотках на рис. 3.

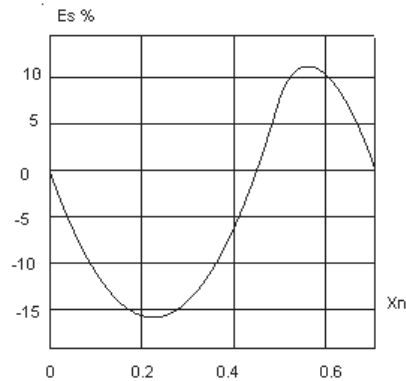


Рис. 3. Графік відхилення характеристики растровання від лінійної

На початку діапазону відхилення від лінійної є від'ємне, поступово збільшується, досягає мінімального значення -15,8 %, переходить через нуль, поступово збільшується, досягаючи максимуму +11,12 %, і в кінці інтервалу прямує до нуля. Нелінійність характеристики растрового перетворення викликає спотворення тоновідтворення, а саме світлі тони розсвітлюються, а сірі притемнюються. Отже, растрове перетворення для елементів круглої форми необхідно коригувати.

Результати імітаційного моделювання растрових густин у вигляді характеристик демодуляції растрового перетворення подані на рис. 4.

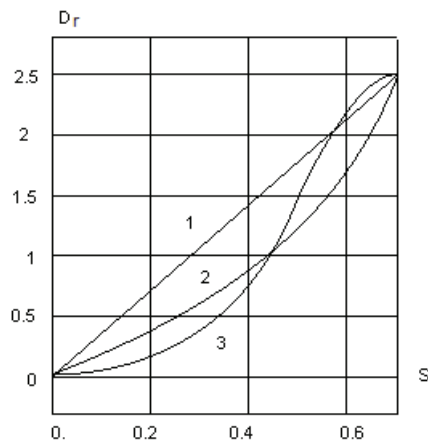


Рис. 4. Характеристики демодуляції растрового перетворення

Для порівняння на рис. 4 подана лінійна характеристика демодуляції растрового перетворення. Нижче розташована традиційна характеристика для лінійної зміни відносної площі (2), яка є вгнутою кривою. Побудована характеристика демодуляції растрового перетворення (3) є похилою S-подібною кривою. На початку діапазону характеристика розміщується нижче лінійної, пересікає лінійну і на другому діапазоні розміщується вище, а в кінці інтервалу прямує до 2,5. Отже, форма кривої дерастрування залежить від закону зміни площі растрового елемента в середині інтервалу тонопередачі. Результати моделювання демодуляції відхилення растрової густини для колових елементів від густини для лінійної зміни площі 2 (рис. 4) подані у відносних одиницях на рис. 5.

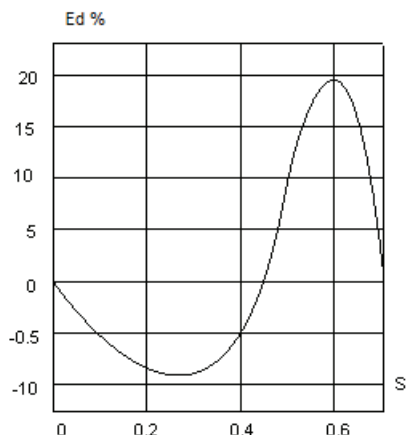


Рис. 5. Графік відхилення растрової густини демодуляції при лінійній зміні площі

Графік відхилення растрової густини демодуляції подібний до рис. 3 (відхилення характеристики растрування), однак максимальне значення відхилення збільшене майже удвічі. Отже, демодуляція растрових елементів круглої форми значно притемнює сірі ділянки зображення, тому необхідно коригувати растрування.

При демодуляції растрового перетворення відбувається деформація характеристики — «розтиск» і «стиснення» характеристики демодуляції на різних діапазонах тонопередачі. Для оцінки якості демодуляції запропоновано визначати локальний контраст демодуляції

$$K_0 = \frac{dD_r}{dS}. \quad (7)$$

Для визначення локального контрасту у симулятор (рис. 1) додатково введено операційні блоки диференціювання Derivative, на входи яких подаються растрові густини, а на їх виході одержуються локальні контрасти, які візуалізуються блоком Score3. Результати імітаційного моделювання локального контрасту демодуляції растрового перетворення подані на рис. 6.

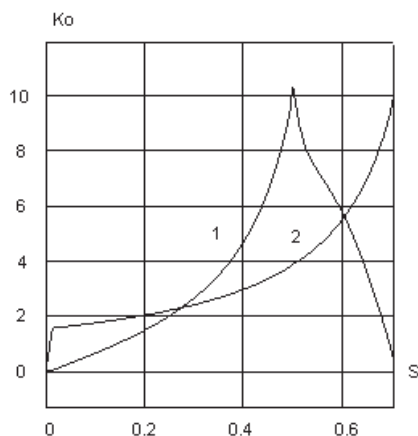


Рис. 6. Графіки локального контрасту демодуляції для різного закону зміни площі растрових елементів

При лінійній зміні площі растрових елементів локальний контраст демодуляції (2) плавно збільшується і прямує до 10. Натомість при S -подібній зміні площі растрових елементів (1) на початку діапазону швидко збільшується і при площі $S=0,5$ досягає максимального значення 10, після чого різко прямує до нуля. Велика крутизна кривої локального контрасту підвищує контрастне відтворення сірих і темних тонів, натомість погіршує якість світлих зображень (розсвітлює), що потребує коригування тонопередачі.

На основі локального контрасту запропоновано визначати теоретичний відносний контраст друку за допомогою коефіцієнта Ширмера [8]

$$K = \frac{D_n - D_r}{D_n}, \quad (8)$$

де D_n — оптична густина плашки; D_r — растрова густина поля контрольної шкали.

Денсиметрія друкованих відбитків здійснюється на основі відомої формули Юла-Нільсена (1) шляхом вимірювання оптичної густини плашки на відбитку і оптичної густини паперу за допомогою денситометра, тому враховує різні впливи, головні через «розтискування» — збільшення геометричних розмірів друкарських елементів [7, 8]. Відносний контраст визначають за зональними оптичними густинами відбитків плашки (100 % покриття) і 80 % покриття растрової шкали (компанія ТЕСИКОН) або 75 % (компанія X-Rite) та 50 % покриття [8]. Значення контрасту залежить від типу і товщини фарби, виду паперу і може бути в межах 0,5 до 0,25 [7, 8]. Сучасні денситометри розраховують коефіцієнт контрасту автоматично, а також визначають відхилення контрасту друку від заданого значення [8]. На основі вищевикладеного за виразом локального контрасту (7) і відносного контрасту (8) за допомогою симулятора розраховували контрасти для різних значень відносної площі растрових елементів для різних законів їх зміни, результати яких подані у таблиці.

Таблиця

**Значення відносного і локального контрастів для різних законів зміни
відносної площі растрових елементів**

Густина, контраст	Відносна площа растрових елементів, S								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7
D_r1	0,187	0,3787	0,6034	0,8752	1,219	1,432	1,688	2,298	2,5
D_r2	0,0553	0,1673	0,3786	0,7472	1,458	1,859	2,178	2,005	2,5
$Ko1$	1,76	2,058	2,439	2,995	3,857	4,586	5,59	7,058	10,15
$Ko2$	0,7082	1,541	2,707	4,79	10,63	7,20	5,643	3,496	0,286
$Kd1$	0,9252	0,8485	0,7586	0,6499	0,5124	0,427	0,325	0,1974	0,0
$Kd2$	0,9779	0,9331	0,8486	0,7011	0,4168	0,256	0,1288	0,038	0,0

Спочатку за таблицею розглянемо відносний контраст при S -подібній зміні площі при відносній площі $0,6 \leq S \leq 0,4$ відносний контраст є в межах $0,7 \leq Kd2 \leq 0,128$ і дає об'єктивну оцінку контрасту на сірих і темних тонах зображень. Натомість при зменшенні відносної площі відносний контраст поступово збільшується і наближається до одиниці. При цьому збільшення відносного контрасту зумовлене зменшенням растрової оптичної густини (див. вираз (8)) і не відповідає фактичному контрасту (див. рис. 4), оскільки крутизна характеристики є досить малою. Отже, при малих відносних площах растрових елементів на світлих тонах відносний контраст визначений за виразом (8) дає недостовірну оцінку демодуляції растрового перетворення.

При демодуляції растрового перетворення для елементів круглої форми, яка має S -подібну характеристику, локальний контраст на малих площах растрових елементів $S=0,1$ становить 0,7082, поступово збільшується, і при $S=0,5$ локальний контраст досягає максимального значення $Ko=10,63$, після чого різко зменшується до нуля. Отже, запропонований локальний контраст об'єктивно оцінює демодуляцію растрового перетворення, що є його перевагою.

Висновки. Більшість поліграфічних державних і міжнародних стандартів і контрольних шкал базуються на растрових елементах круглої форми лініатурою 60 лін/мм, які застосовуються для растрування зображень, коригування тонів, вимірювання оптичної густини та контролю відносного контрасту друку за допомогою коефіцієнта Шпирмера на основі денситометричного вимірювання оптичної густини плашки і растрової густини поля контрольної шкали з 80 % покриттям або 75 %, 50 %, тому виміряні контрасти будуть різнитися (удвічі). Отже, контраст вичерпно не характеризує відтворення тонів зображення і дає некоректні оцінки денситометричних методів для визначення контрасту, розтиску та інших факторів.

На основі розробленої математичної моделі растрового перетворення і симулятора демодуляції для нормованого растрового перетворення круглої форми побудовано характеристику демодуляції для нормованого перетворення елементів

круглої форми, вираженої растровою оптичною густиною, є похилена s-подібна крива. Встановлено, що демодуляція растрового перетворення притемнює сірі ділянки зображення.

Визначено локальний контраст демодуляції при лінійній зміні площі растрових елементів, який плавно збільшується від 1,7 і в кінці діапазону прямує до 10. Натомість, при s-подібній зміні площі на початку діапазону контраст швидко збільшується і при площі $S=0,5$ досягає максимального значення 10, після чого швидко прямує до нуля.

Встановлено, що відносний контраст друку визначений за допомогою коефіцієнта Ширмера при відносній площі $0,6 \leq S \leq 0,4$ є в межах $0,7 \leq Kd2 \leq 0,128$ і дає об'єктивну оцінку контрасту на сірих, темних тонах зображень. Натомість при зменшенні відносної площі контраст поступово збільшується та наближається до одиниці і не відповідає фактичному контрасту. Отже, на світлих тонах він дає недостовірну оцінку демодуляції растрового перетворення, натомість запропонований локальний контраст об'єктивно оцінює демодуляції растрового перетворення, що є його перевагою.

Запропонований локальний контраст можна застосувати на стадії растрування зображень у комп'ютерних видавничих системах та для вимірювання локальних контрастів на тестовій контрольній шкалі для оцінки контрасту на усьому інтервалі тонопередачі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Барановський І. В., Яхимович Ю. П. Поліграфічна переробка образотворчої інформації : навч. посіб. Київ-Львів : ІЗМН, 1998. 400 с.
2. Відтворення зображень растровими скануючими пристроями : навч. посіб. / Гавриш Б. М., Дурняк Б. В., Тимченко О. В., Ющик О. В. Львів : УАД, 2016. 180 с.
3. Лотошинська Н. Д., Івахів О. В. Теорія кольору та кольоровідтворення : навч. посіб. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2014. 204 с.
4. Аналіз демодуляції растрового перетворення з елементами квадратної форми / Луцків М. М., Федина Б. І., Гук І. Б., Бубен В. Р. *Наукові записки [Української академії друкарства]*. 2021. № 2 (63). С. 11–19.
5. Луцків М. М., Гунько Д. Т. Моделювання нормованого растрового перетворення для елементів круглої форми. *Комп'ютерні технології друкарства*. 2018. № 2 (40). С. 116–123.
6. Луцків М. М., Бубен В. Р. Побудова характеристики демодуляції лінійної растрової шкали. *Комп'ютерні технології друкарства*. 2018. № 2 (40). С. 109–115.
7. Назар І. М., Лазаренко Е. Т., Якущевич С. Параметри відбитків рулонного офсетного друку: фактори управління і впливу. Львів : Українська академія друкарства, 2009. 128 с.
8. Пашуля П. Л. Стандартизація, метрологія, відповідність, якість у поліграфії : підруч. Львів : УАД, 2011. 408 с.

REFERENCES

1. Baranovskyi, I. V., & Yakhymovych, Yu. P. (1998). Polihrafichna pererobka obrazotvorchoi informatsii. Kyiv-Lviv : IZMN (in Ukrainian).

2. Havrysh, B. M., Durniak, B. V., Tymchenko, O. V., & Yushchuk, O. V. (2016). Vidtvortnnia zobrazen rastrovymy skanuiuchymy prystroiamy. Lviv : UAD (in Ukrainian).
3. Lotoshynska, N. D., & Ivakhiv, O. V. (2014). Teoriia koloru ta kolorovidtvorennia. Lviv : Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki (in Ukrainian).
4. Lutskiv, M. M., Fedyna, B. I., Huk, I. B., & Buben, V. R. (2021). Analiz demoduliatsii rastrovoho peretvorennia z elementamy kvadratnoi formy: Naukovi zapysky [Ukrainskoi akademii drukarstva], 2 (63), 11–19 (in Ukrainian).
5. Lutskiv, M. M., & Hunko, D. T. (2018). Modeliuvannia normovanoho rastrovoho peretvorennia dlia elementiv kruhloi formy: Komp'uterni tekhnologii drukarstva, 2 (40), 116–123 (in Ukrainian).
6. Lutskiv, M. M., & Buben, V. R. (2018). Pobudova kharakterystyky demoduliatsii liniinoi rastrovoi shkaly: Komp'uterni tekhnologii drukarstva, 2 (40), 109–115 (in Ukrainian).
7. Nazar, I. M., Lazarenko, E. T., & Yakutsevych, S. (2009). Parametry vidbytkiv rulonnoho ofsetnoho druku: faktory upravlinnia i vplyvu. Lviv : Ukrainska akademiia drukarstva (in Ukrainian).
8. Pashulia, P. L. (2011). Standartyzatsiia, metrolohiia, vidpovidnist, yakist u polihrafi. Lviv : UAD (in Ukrainian).

doi: 10.32403/1998-6912-2022-2-65-57-67

MODELLING OF TONE REPRODUCTION DURING DE-RASTERISATION WITH ELEMENTS OF ROUND SHAPE

M. M. Lutskiv, I. B. Huk, B. I. Fedyna

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

A mathematical model of tone reproduction during de-rasterisation with round elements is developed, which is based on the Yule-Nielsen demodulation formula, normalised raster transformations and the proposed local contrast. The raster density of the demodulation of the nonlinear raster transformation is determined for elements of round shape, the characteristic of which is an inclined S-shaped curve. It is established that the shape of the demodulation curve is determined by the accepted law of change of the raster element area and, therefore, by the tone reproduction of a specific image (light, grey, dark). The deviation of the raster density characteristic of the demodulation of the raster transformation for round elements from the linear one is determined and it is established that the demodulation brightens light tones and darkens grey ones. A structural diagram of the demodulation and contrast simulator model is constructed in the Matlab:Simulink package, which makes it possible to simultaneously calculate and construct the gradation characteristics of tone reproduction during demodulation, the characteristics of local contrast, and analyse the properties of raster tone reproduction.

The results of simulation modelling are presented in the form of gradation characteristics of raster transformation demodulation, expressed by raster densities in which the relative area changes according to linear and nonlinear rasterisation algorithms. It is suggested to assess the demodulation characteristic by the deviation from the linear one, which is a sinusoidal curve with a minimum deviation of -9.177% and a maximum value of +19.62%. The local contrast of tone reproduction is determined, which depends on the tone transfer interval, which for a linear law of area change gradually increases from 1.7 to 10.15 units, and for a non-linear change it is in the range from 0.71 to 10.63 units over the entire tone transfer interval. It is established that on the average range of tone transfer, with an area of elements $0.6 \leq S \leq 0.4$, the relative contrast is in the range of $0.7 \leq K_o \leq 0.128$, which gives an objective estimate of the contrast, on the other hand, with a small area, on light tones, the relative contrast gives an unreliable estimate of demodulation of raster transformation.

Keywords: *modelling, demodulation, rasterisation, round element, simulator, characteristics, local contrast, quality.*

Стаття надійшла до редакції 04.08.2022.

Received 04.08.2022.