

ПРОЦЕСИ: аналіз, моделювання, оптимізація

УДК 681.518

© М. Крик¹, М. Шовгенюк², Н. Занько¹, 2010

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ АНАЛІТИЧНОГО МЕТОДУ КОЛЬОРОПОДІЛУ ЗОБРАЖЕННЯ

Побудовано кольорове охоплення тріадних фарб на CaS-діаграмі, розроблено алгоритми пошуку сектору попарного накладання фарб на CaS-діаграмі та програмної реалізації кольороподілу зображення на основі аналітичних розв'язків автотипних рівнянь. Проведено чисельні розрахунки співвідношення фарб для заданого кольору та показано, що аналітичний метод дає оптимальне співвідношення фарб для його відтворення

It was got the colored area of color set on the CaS-diagram, there were developed the algorithms of searching two-colors sector on the CaS-diagram and programm realization of image color separation based on analytical solves of autotype equations. There were resulted the numeral calculations of inks for the set color, it was shown that an analytical method gives optimal correlation of inks for its recreation.

1. ВСТУП

Відомо, що різноманітність кольорів і відтінків кольорових оригіналів можна відтворити накладанням тріадних фарб: жовтої, пурпурної та голубої з додаванням четвертої, чорної фарби. Над синтезом кольорів у трифарбовому друці одночасно працювали вчені Ньюберг і Нейгебауер. У роботі Ньюберга [1] вперше описана модель автотипного синтезу кольорів у трифарбовому растровому друці та сформульований принцип просторового змішування кольорів різних фарб, за яким вектор результуючого кольору дорівнює векторній сумі добутків усіх кольорів, що синтезуються відповідними фарбами, на їх відносну площу, яку вони займають на растровому відбитку. Нейгебауер у роботах [2, 3] на основі Міжнародних координат кольорів *CIE XYZ* записав аналітичні рівняння автотипного синтезу кольорів у багатофарбовому друці, загальновідомі як рівняння Ньюберга–Нейгебауера, які є теоретичною базою моделювання кольорів у растровому процесі. Рівняння Ньюберга–Нейгебауера побудовані на основі використання рівнянь Де-

¹ Українська академія друкарства

² Інститут фізики конденсованих систем НАН України

мішеля [4], які визначають відносні площі растрових елементів усіх базових кольорів.

Для того, щоб наблизитись до гами реальних кольорів, чи до гами кольорів відтворених на моніторі, виникла потреба розширити повноколірний друк в трьох визначальних напрямках: синій/фіолетовий/пурпурний, бірюзовий/зелений/жовтий, оранжевий/червоний. Куперс [7] запропонував вирішити цю проблему введенням додаткових кольорів (червоного, синього, зеленого) до СМҮК. Проте, аналіз включав лише кольори, які можуть бути відтворені лінійною адитивною комбінацією основних кольорів, не враховуючи специфіки офсетного друку.

В роботі Остромоухова [8] порівнювались кольорові охоплення фарб при чотири-, семи- і дев'ятифарбовому друці. На основі рівнянь Нейгебауера вченими [8] змодульовано процес повноколірного друку, і сформульовано, що п'яти-, семи- і будь-який $(2 \times n + 1)$ -фарбовий друк потребує для відтворення заданого кольору лише трьох фарби. Це означає, що аналітичний розв'язок автотипних рівнянь можна використати і для багатофарбового друку, лише необхідно знати, якими двома кольоровими фарбами з додаванням чорної можна відтворити заданий колір.

При накладанні декількох фарб одна на одну виникає проблема перезволоження паперу, тому введені обмеження на максимально допустиму сумарну кількість фарб (TAC – total inks coverage), що наносяться на папір. На практиці рекомендований оптимальний варіант максимальної кількості фарб становить 300% [9].

На основі використання нового колірному простору *ICaS* [5] сформульований принцип відтворення заданого кольору області кольорового покриття тріадних фарб **двома кольоровими та чорною** фарбами. Це дозволило авторам [6] вперше отримати аналітичні розв'язки систем автотипних рівнянь.

2. КОЛЬОРОВЕ ОХОПЛЕННЯ ТРІАДНИХ ФАРБ НА *CAS*-ДІАГРАМІ ТА АЛГОРИТМ ЗНАХОДЖЕННЯ СЕКТОРУ ЗАДАНОГО КОЛЬОРУ

Використовуючи новий колірний простір *ICaS* [5] та загальне векторне рівняння (1), відтворене кольорове охоплення тріадних фарб для офсетного друку на крейдованому папері (рис. 1).

$$\mathbf{C}_{gen} = S_K^0 \left(S_C^0 \mathbf{R}_0 + S_M^0 \mathbf{G}_0 + S_Y^0 \mathbf{B}_0 + S_M^0 S_Y^0 \mathbf{C}_0 + S_C^0 S_Y^0 \mathbf{M}_0 + S_C^0 S_M^0 \mathbf{Y}_0 + S_C^0 S_M^0 S_Y^0 \mathbf{K}_0 \right). \quad (1)$$

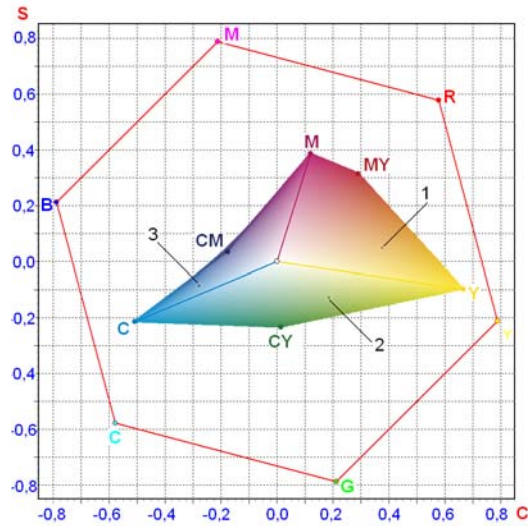


Рис. 1. Область кольорового покриття тріадних фарб на CaS-діаграмі:
 колір 1 – RGB (199, 157, 74), колір 2 – RGB (137, 161, 84),
 колір 3 – RGB (68, 128, 171)

Найбільша область кольорового охоплення досягається чистими тріадними фарбами і їх попарним накладанням, тому для побудови кольорового охоплення тріадних фарб на CaS-діаграмі чорна фарба не враховується ($S_K^0 = 1$). Для розрахунку ICaS-координат заданого кольору застосовувались три системи автотипних рівнянь, які можна подати в загальному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} IO_{gen} &= S_K^0 \left[IO_{ij} + (IO_j - IO_{ij})S_i^0 + (IO_i - IO_{ij})S_j^0 + IK_{ij}S_i^0S_j^0 \right] \\ CO_{gen} &= S_K^0 \left[CO_{ij} + (CO_j - CO_{ij})S_i^0 + (CO_i - CO_{ij})S_j^0 + CK_{ij}S_i^0S_j^0 \right] \\ SO_{gen} &= S_K^0 \left[SO_{ij} + (SO_j - SO_{ij})S_i^0 + (SO_i - SO_{ij})S_j^0 + SK_{ij}S_i^0S_j^0 \right] \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де коефіцієнти: $IK_{ij} = (IO_w - IO_i - IO_j + IO_{ij})$;

$$CK_{ij} = (CO_w - CO_i - CO_j + CO_{ij});$$

$$SK_{ij} = (SO_w - SO_i - SO_j + SO_{ij}).$$

Індекси i, j для кожної з трьох систем рівнянь набирають такого вигляду відповідно:

- 1) $i = Y, j = M, ij = YM$; 2) $i = Y, j = C, ij = YC$;
 3) $i = M, j = C, ij = MC$.

Для побудови кольорового охоплення триадних фарб на CaS -діаграмі застосовані матриця перетворення RGB -координат кольорів (3) та координати базових векторів, які за експериментальними даними FOGRA відповідають стандартизованим умовам офсетного друку на крейдованому папері.

Таблиця 1

Базові вектори триадних фарб за даними FOGRA 27

	R	G	B
C	0,0189	0,4972	0,7917
M	0,6483	0,0777	0,3434
Y	0,9738	0,8633	0,1002
MY	0,6628	0,1265	0,1504
CY	0,1334	0,4464	0,1983
CM	0,1536	0,1709	0,3824

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & H_1 & -H_2 \\ 1 & -H_2 & H_1 \end{bmatrix}, \quad H_1 = \frac{\sqrt{3}-1}{2}; \quad H_2 = \frac{\sqrt{3}+1}{2}. \quad (3)$$

Якщо заданий колір знаходиться в межах кольорового охоплення триадних фарб, він точно відтворюється **двома триадними і чорною фарбами**. Як видно з рисунку, на CaS -діаграмі заданий колір займає положення в одній з трьох областей, обмежених лініями кольорів чистих триадних фарб.

Алгоритм пошуку області CaS -діаграми, в якій знаходиться заданий колір, полягає в порівнянні величини кута точки заданого кольору відносно початку координат з аналогічними кутами, що утворюють чисті триадні фарби. На рис. 2 представлена блок-схема алгоритму.

Вхідними даними слугують координати кольору в системі $ICaS$. За умови $C \neq 0$ вище зазначений кут вираховують за формулою:

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \arccos\left(\frac{C^2}{\sqrt{C^2 + S^2}}\right), & S > 0 \\ \theta &= 360^\circ - \arccos\left(\frac{C^2}{\sqrt{C^2 + S^2}}\right), & S \leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

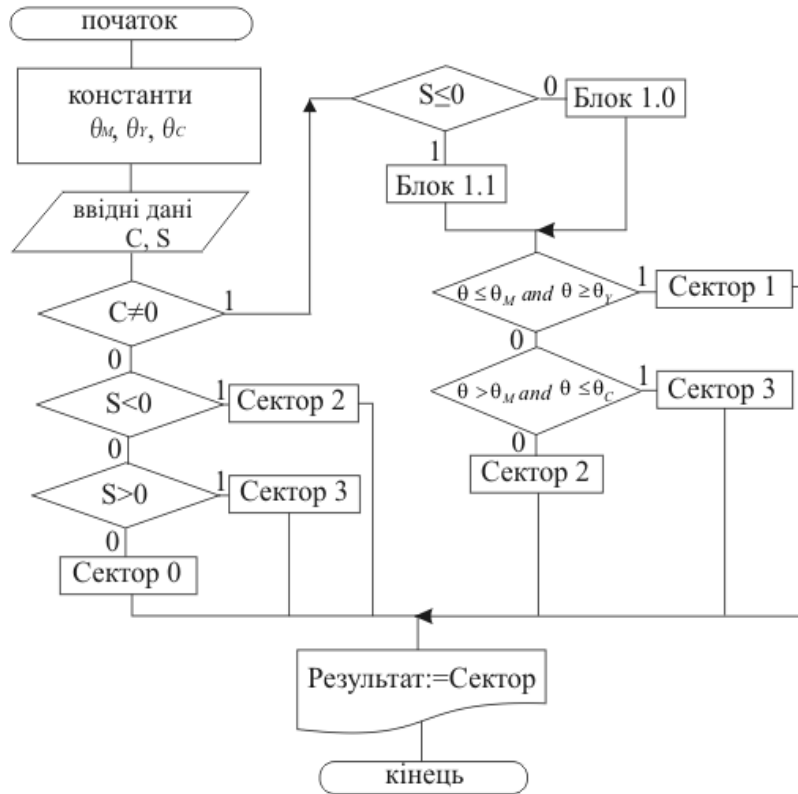


Рис. 2. Блок-схема алгоритму знаходження області CaS-діаграми для заданого кольору

Якщо координати $C=0$ та $S>0$ – заданий колір знаходиться в області CM (Сектор 3), при $S<0$ – в області CY (Сектор 2). Випадок, коли обидві хроматичні координати рівні нулю (Сектор 0) – колір визначатиметься ахроматичною координатою, тобто чорною фарбою. Зреалізувавши розроблений алгоритм, отримаємо область CaS-діаграми, в якій знаходиться колір і відповідно, якими двома тріадними фарбами з додаванням чорної можна його відтворити.

Таким чином, будь-який колір, що входить в область покриття тріадних фарб можна відтворити **двома тріадними і чорною фарбами**, попередньо визначивши, в якому секторі накладання фарб, він знаходиться.

3. АЛГОРИТМ КОЛЬОРОПОДІЛУ ЗОБРАЖЕННЯ НА ОСНОВІ АНАЛІТИЧНИХ РОЗВ'ЯЗКІВ АВТОТИПНИХ РІВНЯНЬ

В основі алгоритму лежать аналітичні розв'язки автотипних рівнянь [6]. Колір, який входить в область охоплення тріадних фарб можна відтворити накладанням **двох кольорових і чорної фарб**. Відносні площі відповідних фарб, в залежності від області знаходження, визначають за однією з трьох типових систем автотипних рівнянь (2). Отримані значення відносних площ переводять в *RGB*-координати і поточний піксель зображення дублюється на чотирьох кольороподільних зображеннях.

На рис.3 представлена блок-схема алгоритму кольороподілу зображення на основі аналітичних розв'язків автотипних рівнянь. Відбуваються два цикли зчитування зображення: зовнішній – зчитування пікселів по висоті, внутрішній – по ширині. У внутрішньому циклі відбуваються наступні операції:

- представлення кольору поточного пікселя зображення в системі *RGB*;
- перетворення кольору із системи *RGB* в *ICaS*;
- виведення точки кольору на *CaS*-діаграмі;
- пошук області попарного накладання фарб;
- знаходження коефіцієнтів для системи автотипних рівнянь (Блок А1);
- перевірка можливості відтворення даного кольору тріадними фарбами (Блок В);
- аналітичний розв'язок системи автотипних рівнянь (Блоки А2, С1, С2, С3), в результаті отримаємо значення відносних площ тріадних фарб $S_C^0, S_M^0, S_Y^0, S_K^0$.
- дублювання поточного пікселя на чотирьох кольороподільних зображеннях кольором в системі *RGB* (Блок А3).

В блоці А1 визначаються постійні коефіцієнти квадратного рівняння для однієї з фарб [6]

$$A + BS_i^0 + F(S_i^0)^2 = 0 \quad (5)$$

$$A = \begin{vmatrix} IO_{gen} & IO_i & IO_{ij} \\ CO_{gen} & CO_i & CO_{ij} \\ SO_{gen} & SO_i & SO_{ij} \end{vmatrix}; \quad (6)$$

$$B = \begin{vmatrix} IO_{gen} & IO_i & IO_j - IO_{ij} \\ CO_{gen} & CO_i & CO_j - CO_{ij} \\ SO_{gen} & SO_i & SO_j - SO_{ij} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} IO_{gen} & IO_W - IO_i & IO_j \\ CO_{gen} & CO_W - CO_i & CO_{ij} \\ SO_{gen} & SO_W - SO_i & SO_{ij} \end{vmatrix}; \quad (7)$$

$$F = \begin{vmatrix} IO_{gen} & IO_W - IO_i & IO_j - IO_{ij} \\ CO_{gen} & CO_W - CO_i & CO_j - CO_{ij} \\ SO_{gen} & SO_W - SO_i & SO_j - SO_{ij} \end{vmatrix}. \quad (8)$$

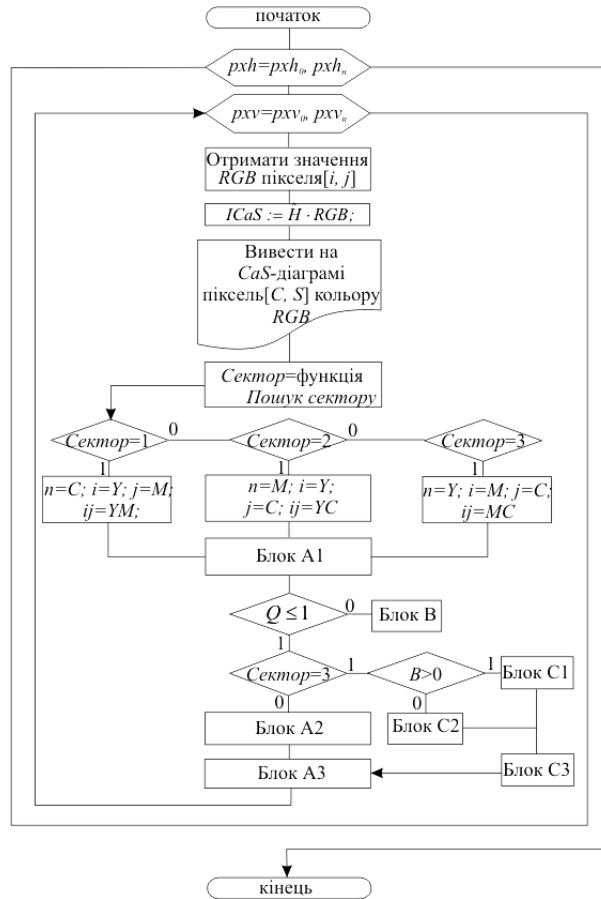


Рис. 3. Алгоритм кольороподілу зображення на основі аналітичних розв'язків автотипних рівнянь

Рівняння (5) має два аналітичні розв'язки. Проведенням числових розрахунків встановлено, що реальні результати дає лише один з розв'язків, за умови якщо це перший або другий сектор на CaS -діаграмі і два розв'язки, якщо це третій сектор:

$$S_i^0 = -\frac{B}{2F} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4AF}{B^2}} \right), \quad (9)$$

оскільки підкореневий вираз не може бути від'ємним, необхідно перевірити умову додатності, в іншому випадку можна стверджувати, що заданий колір не входить в межі охоплення триадних фарб:

$$Q \leq 1, \quad \text{де } Q = \frac{4AF}{B^2} \quad (10)$$

Блок А2 визначає відносні площі фарб, якими можна відтворити відповідний колір, за формулами (5-8, 11-14):

$$S_j^0 = -\frac{A_C + C_C \cdot S_i^0}{B_C + D_C \cdot S_i^0} \quad (11)$$

$$A_C = \begin{vmatrix} I0_{gen} & I0_{ij} \\ C0_{gen} & C0_{ij} \end{vmatrix}; \quad B_C = \begin{vmatrix} I0_{gen} & I0_i - I0_{ij} \\ C0_{gen} & C0_i - C0_{ij} \end{vmatrix}; \quad (12)$$

$$C_C = \begin{vmatrix} I0_{gen} & I0_j - I0_{ij} \\ C0_{gen} & C0_j - \tilde{N}0_{ij} \end{vmatrix}; \quad D_C = \begin{vmatrix} I0_{gen} & IK_{ij} \\ C0_{gen} & \tilde{N}K_{ij} \end{vmatrix}.$$

$$S_K^0 = \frac{I0_{gen}}{I0_{ij} + (I0_i - I0_{ij})S_j^0 + (I0_j - I0_{ij})S_i^0 + IK_{ij}S_i^0S_j^0} \quad (13)$$

$$S_N^0 = 1 \quad (14)$$

Блок А3 переводить значення отриманих відносних площ фарб в градацію сірого в системі RGB . В результаті отримаємо чотири окремих монохромних кольороподільних зображення.

Блок В передбачає присвоєння поточному пікселю червоного кольору на чотирьох кольороподільних зображеннях, у випадку, якщо колір не входить в кольорове охоплення фарб (10).

Блоки С1 і С2 задіюються, якщо колір знаходиться у третьому секторі. Оскільки в цьому випадку рівняння (6) має два розв'язки (9).

Отже, взявши за основу принцип відтворення кольору двома триадними і чорною фарбами та аналітичний метод розв'язку автотипних рівнянь розроблено алгоритм кольороподілу зображення.

4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

На відміну від аналітичного методу розв'язку автотипних рівнянь, який дає граничне і оптимальне співвідношення фарб, чисельним методом отриманий цілий ряд співвідношень кількості фарб для відтворення заданого кольору.

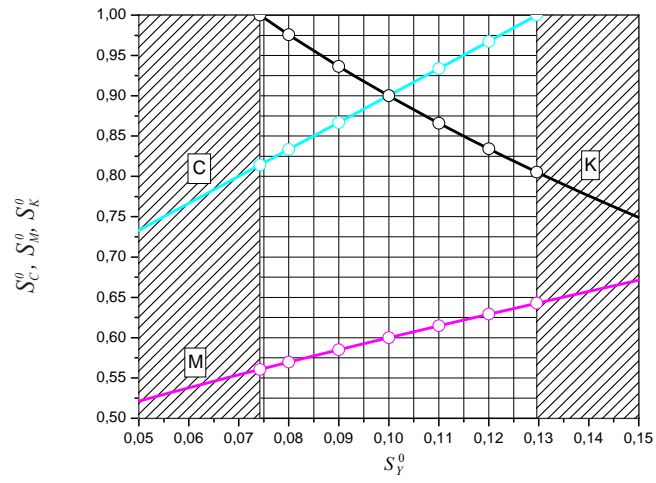


Рис. 4 Область відтворення кольору 1

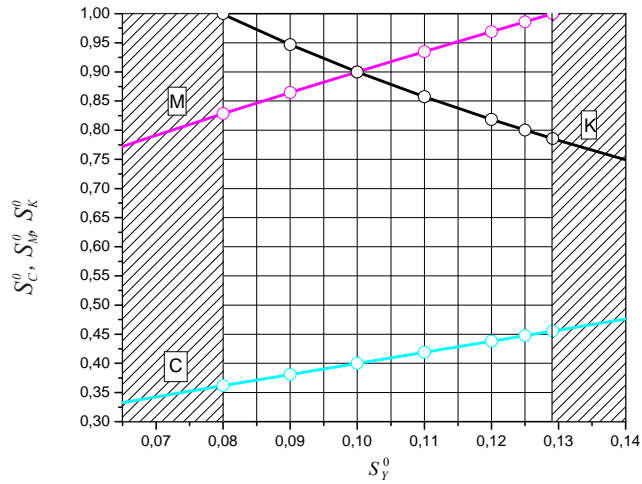


Рис. 5 Область відтворення кольору 2

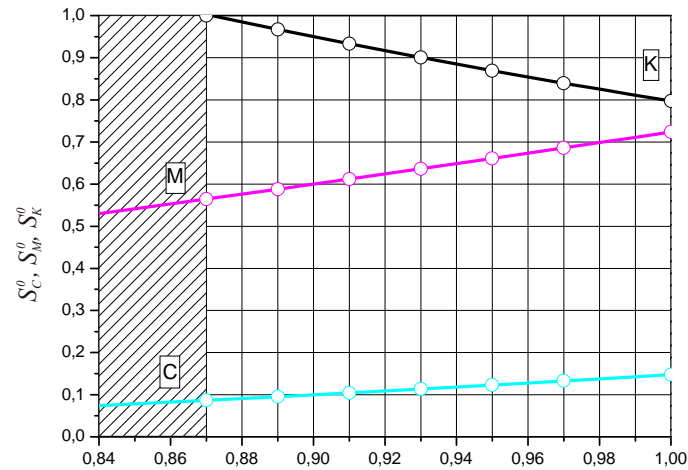


Рис. 6 Область відтворення кольору 3

Підставивши значення $ICaS$ -координат заданого кольору та координати базових векторів в загальне векторне рівняння (1), отримаємо рівняння для знаходження відносних площ тріадних фарб, причому значення відносних площ голубої, пурпурної і чорної виражаються через жовту. Значення відносних площ тріадних фарб можливі в межах від 0 до 1, протабулювавши значення жовтої фарби отримаємо ряд відносних площ голубої, пурпурної і чорної фарб.

Колір 1 на CaS -діаграмі знаходиться в секторі MU (див. рис. 1), тобто він однозначно відтворюється пурпурною, жовтою і чорною фарбами. На рис. 4 видно, що додавання голубої фарби обернено пропорційне додаванню чорної. Наводиться ряд кількісних співвідношень фарб для відтворення одного й того ж самого кольору й обмежується граничним значенням відносних площ чорної і голубої фарб. Сума площ накладання фарб у граничних випадках складає: 155% (при накладанні голубої, пурпурної та жовтої) та 142% (при накладанні пурпурної, жовтої та чорної).

Для кольору 2 (рис. 5) сума площ накладання фарб у граничних випадках складає: 173% (при накладанні голубої, пурпурної та жовтої) та 163% (голубої, жовтої та чорної).

Для кольору 3 (рис. 6) сума площ накладання фарб у граничних випадках складає: 147,5% (при накладанні голубої, пурпурної та жовтої) та 133% (при накладанні голубої, пурпурної та чорної).

На основі отриманих співвідношень кількостей фарб проведений аналіз результатів розрахунку відносних площ для кольорів 1, 2 і 3.

Таблиця 2

Чисельні результати та аналітичні розв'язки
відносних площ триадних фарб

		Чисельні розв'язки						Аналітичні розв'язки
		1	2	3	4	5	6	7
Колір 1	S_C^0	0,814	0,833	0,867	0,900	0,934	0,968	1,000
	S_M^0	0,561	0,570	0,585	0,600	0,615	0,629	0,643
	S_Y^0	0,074	0,080	0,090	0,100	0,110	0,120	0,130
	S_K^0	0,999	0,976	0,937	0,900	0,866	0,834	0,805
$\Sigma S=4-\Sigma S_i^0, \%$		155,10	154,11	152,19	149,99	147,58	144,95	142,23
Колір 2	S_C^0	0,362	0,381	0,400	0,420	0,438	0,448	0,455
	S_M^0	0,829	0,865	0,900	0,935	0,969	0,986	1,000
	S_Y^0	0,080	0,090	0,100	0,110	0,120	0,125	0,129
	S_K^0	0,999	0,945	0,900	0,857	0,818	0,800	0,785
$\Sigma S=4-\Sigma S_i^0, \%$		173,06	171,75	170,00	167,89	165,46	164,15	163,01
Колір 3	S_C^0	0,088	0,096	0,104	0,114	0,123	0,133	0,148
	S_M^0	0,567	0,588	0,612	0,636	0,661	0,686	0,724
	S_Y^0	0,872	0,890	0,910	0,930	0,950	0,970	1,000
	S_K^0	0,999	0,967	0,933	0,901	0,870	0,840	0,797
$\Sigma S=4-\Sigma S_i^0, \%$		147,45	145,91	144,03	141,94	139,64	137,16	133,11

5. ВИСНОВКИ

В даній роботі описаний алгоритм отримання кольороподільного зображення на основі аналітичних розв'язків автотипних рівнянь за даними базових векторів триадних фарб, отримані числові значення кількості фарб для відтворення заданого кольору і зроблене порівняння результатів розрахунку кількості фарб з аналітичним розв'язком автотипних рівнянь, який дає оптимальне співвідношення кількості фарб для відтворення необхідного кольору.

Як впливає з проведених розрахунків, один і той самий колір можна відтворити різним співвідношенням чотирьох фарб (СМУК), або в граничному випадку трьома фарбами – *двома триадними і чорною*,

що і є перевагою запропонованого аналітичного методу. Такий метод розв'язку автотипних рівнянь дає найоптимальніше співвідношення фарб для відтворення заданого кольору.

1. Нюберг Н.Д. Метод расчета цветоделения в автотипной трехцветке : Тр. НИИ ОГИЗ / Нюберг Н.Д. М., 1935.– Вып. II.–С. 173-183.2. Neugebauer H. E. J. Die theoretischen Grundlagen des Mehrfarbendrucks / H. E. J. Neugebauer // Zeitschrift für wissenschaftliche Photographie, Photoophysik und Photochemie.– 1937. – Vol. 36, p. 36-73; reprinted in Neugebauer Memorial Seminar on Color Reproduction (14-15 Dec. 1989, Tokyo, Japan) // Proc. SPIE, Vol. 1184, P. 194-202 (1990). 3. Neugebauer H. E. J. The theoretical basis of multicolor letterpress printing. Translated [2] by D. Wyble and A. Kraushaar, commentary by M. Pearson / H. E. J. Neugebauer // Color Research and Application.– 2005. – Vol. 30 Issue 5, P. 322- 331. 4. Demichel E. M. / Demichel E. M. // Le procédé.– 1924. – Vol. 26, P. 17-21, 26-27. 5. Шовгенюк М. В. Новий кольоровий простір ICaS на основі перетворення Хартілі / Шовгенюк М. В. – Львів: ІФКС НАН України, 2009. – 24 с. – (Препринт / НАН України, ІФКС ;). 6. Шовгенюк М. В. Аналітичний розв'язок систем автотипних рівнянь / М.В. Шовгенюк, М. Р. Крик // Наукові записки УАД.– 2010. (у друці). 7. H. Küppers. Die Farbenlehre der Fernseh-, Foto- und Drucktechnik: Farbentheorie der visuellen Kommunikationsmedien. DuMont Buchverlag, Köln, 1985. 8. Ostromoukhov V. Chromaticity gamut enhancement by heptatone multi-color printing. 9. KPG Color Fidelity Module User Guide for Macintosh OS X [б/а] [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://graphics.kodak.com>